



Lauri Kujala

Rakennustavan vaikutus konealueiden varustelun tehokkuuteen kokoonpanotelakkakonseptissa

Diplomityö, joka on jätetty opinnäytteenä tarkastettavaksi diplomi-insinöörin tutkintoa varten.

Espoossa 1.12.2014
Valvoja: Professori Heikki Remes
Ohjaajat: Tekniikan lisensiaatti Matti Nallikari
 Diplomi-insinööri Henri Tokola

Tekijä: Lauri Kujala

Työn nimi: Rakennustavan vaikutus konealueiden varustelun tehokkuuteen kokoonpanotelakkakonseptissa

Laitos: Sovelletun mekaniikan laitos

Professori: Meritekniikka

Professuurikoodi: Kul-24

Työn valvoja: Professori Heikki Remes

Työn ohjaajat: Tekniikan lisensiaatti Matti Nallikari

Diplomi-insinööri Henri Tokola

Päivämäärä: 1.12.2014

Sivumäärä: 88 + 7

Kieli: Suomi

Laivanrakennusteollisuudessa telakat pyrkivät jatkuvasti kehittämään tuotantostrategioitaan ja tehostamaan tuotantoaan. Yksi varteenotettava tuotannontehostamismetodi on laivan varustelutyön suorittaminen mahdollisimman aikaisessa tuotantovaiheessa, esimerkiksi lohkovarusteluvaiheessa. Tässä diplomityössä tarkastellaankin rakennustavan vaikutusta työaluksen konetornin varustelun tehokkuuteen. Työssä tarkastellaan erityisesti sitä, minkälaisia lohkoja tulee lohko-toimittajalta kokoonpanotelakalle toimittaa varustelutyön tehokkuuden maksimoimiseksi?

Tutkimuksen päätavoitteena oli vertailla viiden eri lohkoitoitusmallin vaikutusta kokoonpanotelakan varustelun tehokkuuteen. Kaikille viidelle eri toimitusmallille luotiin työssä yksilöllinen rakennustapa. Työn tavoitteena oli myös luoda menetelmä lohkovarustelun hyvyyden mittaamiseksi ja muodostaa luotua menetelmää tukeva laskentamalli laivan varusteluprosessille. Lisäksi työssä luotiin uusi hierarkia laivan rungon muodostaville teräsmoduuleille.

Lohkovarustelun hyvyyden mittariksi valittiin moduuli- ja lohkovarustelutuntien suhde kokonaisvarustelutunteihin ottaen huomioon vain tuotannon välittömät työtunnit. Varusteluprosessin keston laskentamalli perustuu eri varustelutoimintojen (moduulivarustelu, tasolohkovarustelu, lohkovarustelu, aluevarustelu) välisiin työaikakertoimiin. Nämä kertoimet määritettiin kirjallisuuden perusteella ja varmistettiin niiden sopivuus kokoonpanotelakkaan telakalla suoritettujen asiantuntijahaastatteluiden pohjalta. Kyseistä mallinnusta ei kirjallisuuden perusteella aikaisemmin kokoonpanotelakkakonseptissa ole tehty.

Tutkimuksessa saatujen tulosten pohjalta voidaan todeta avonaisten runkolohkojen tai vaihtoehtoisesti ehjien osalohkojen tukevan työlaivan varustelutyön tehokkuutta kokoonpanotelakkakonseptissa parhaiten sekä sopivan kyseisen konseptin tuotantostrategiaan. Tilaamalla lohkot lohko-toimittajalta avonaisina runkolohkoina voidaan tuotannon välittömiä työtunteja vähentää 21% verrattuna työssä käytettyyn referenssiprojektiin. Puolestaan ehjien osalohkojen tapauksessa päästään parhaimmillaan 25% säästöön tuotannon välittömissä työtunneissa.

Työssä kehitetty laskentamalli antaa hyvän kokonaiskuvan varustelun välittömien tuntien kokonaiskeston muutoksesta eri lohkoitoitusmalleilla. Luotua mallia voi soveltaa kaikilla telakoilla, kunhan edellisten laivaprojektien varustelutunneista on olemassa tilastitietoa. Työaikakertoimien oikeellisuuteen on syytä suhtautua kriittisesti, koska niiden paikkansa pitävyyttä on vaikea todentaa. Mallissa myös oletetaan, että varustelutyö sujuu ongelmitta eli jokainen tehty työtunti on tehokkuudeltaan samanarvoinen. Tästä syystä tulosten oikeellisuus ja mallin luotettavuus tulee tulevaisuudessa varmistaa empiirisen tutkimuksen avulla.

Avainsanat: Kokoonpanotelakkakonsepti, Lohkovarustelu, Modulointi, Varustelu

Author: Lauri Kujala

Title of thesis: Analysis of various block building methods on the outfitting efficiency of an assembly shipyard

Department: Department of Applied Mechanics

Professorship: Naval Architecture

Code of professorship: Kul-24

Supervisor: Professor Heikki Remes

Instructors: Matti Nallikari, Lic.Sc. (Tech.)
Henri Tokola, M.Sc. (Tech.)

Dated: 1.12.2014

Number of pages: 88 + 7.

Language: Finnish

In shipbuilding industry, the shipyards are constantly striving to develop their production strategies in order to increase their production efficiency. One possibility to increase the production efficiency is to execute the ship's outfitting work as early as possible for example in block outfitting stage. Thus the effects of building method on outfitting efficiency are analyzed in this thesis. One part of the research question can be submitted as; What kind of steel structures should be delivered from block supplier to assembly shipyard in order to maximize the outfitting efficiency?

The primary goal of the research is to compare the effects of five different block delivery models on outfitting efficiency in assembly shipyard. In this research an individual building method was generated for all the five models. Also the goals of the research were to develop a method to measure the goodness of block outfitting and to generate a calculation model concerning ship's outfitting process. Also new hierarchy for the steel modules was created.

The ratio between block and modular outfitting hours and total outfitting hours were selected to meter goodness of block outfitting. The ratio takes only into consideration direct working hours of the production. The calculation model concerning ship's outfitting process is based on the time relation between different outfitting stages such as modular outfitting, flat block outfitting, block outfitting and onboard outfitting. The time relations between different outfitting stages are based on literature and opinion of experts from Helsinki shipyard. According to literature this kind of analytical modelling has never been done before in assembly shipyard concept.

The results of the thesis indicate that open hull blocks and intact sections are the best options regarding the outfitting efficiency in assembly shipyard. Also these steel modules will fit to the assembly shipyard's production strategy. By ordering open hull blocks instead of closed hull blocks, the direct working hours can be reduced by 21%. The significant reduction of direct production hours (25%) can be obtained by applying the intact section building strategy.

The created calculation model gives good overview of the reduction of direct outfitting working hours when applying different block delivery models. The model can be applied in all kind of shipyards providing that the shipyard has outfitting statistics from the previous projects. The calculation model assumes that all the production hours are equivalent. Also relation between different outfitting stages are hard to verify, thus a critical approach to the results is appropriate. The empirical study should be used in the future to verify the validity of the presented results and the validity of the calculation model.

Keywords: Assembly shipyard, Block outfitting, Modularization, Outfitting

Esipuhe

Tämä diplomityö on tehty Arctech Helsinki Shipyard Oy:n rahoittamana. Työssä mallinnetaan laivan varusteluprosessin tehokkuutta kokoonpanotelakkakonseptissa tutkimuksessa luodun laskentamallin avulla. Haluaisin kiittää Arctech Helsinki Shipyardia työn rahoituksesta.

Työn aikana olen saanut lukuisia hyviä neuvoja ja kannustavaa palautetta professori Heikki Remekseltä sekä työn ohjaajilta Matti Nallikarilta ja Henri Tokolalta. Heitä haluan tästä syystä kiittää suuresti. Professori Heikki Remestä haluan lisäksi kiittää avustaa laajan aihealueen rajaamisessa. Lisäksi työn mahdollistamisesta sekä aihepiirin ideoinnista haluan kiittää Mattia. Henrin kommentit ja huomiot olivat tärkeitä laskentamallin luomisen yhteydessä, kiitos niistä.

Työn case-tutkimuksen suorittamiseksi sain hyvät pohjatiedot Helsingin telakan työsuunnittelijoilta. Haluaisinkin kiittää kaikkia työn suorittamiseen osallistuneita Helsingin telakan työntekijöitä neuvoista ja materiaalista. Ilman teitä case-tutkimus olisi jäänyt tekemättä.

Lopuksi haluan kiittää vanhempiani katkeamattomasta tuesta koko opiskeluni ajan, erityisesti vaikeina hetkinä sekä avovaimoani Ninniä kannustuksesta ja työrauhasta koko diplomityöprosessin ajan.

Espoossa 1.12.2014

Lauri Kujala

Sisällysluettelo

Tiivistelmä

Abstract

Esipuhe

Lyhenteet ja termit	vii
1 Johdanto	1
1.1 Tutkimuksen taustaa	1
1.2 Tutkimusongelma ja tavoitteet	2
1.3 Työn rajausta	3
2 Tuotantoprosessi kokoonpanotelakalla	5
2.1 Kokoonpanotelakan toiminta	5
2.1.1 Alihankintasopimukset laivanrakennuksessa	6
2.1.2 Toimitusketjun kehitys KPT- konseptissa	7
2.2 Rakennustapa	8
2.2.1 Lohkojen määrittäminen	9
2.2.2 Lohkoissa huomioon otavat tekijät	12
2.3 Lohkotuotanto	13
2.4 Varustelu	14
2.5 Lohkovarusteluprosessi	16
2.5.1 Moduulivarustelu osana lohkovarustelua	18
2.5.2 Konehuoneen lohkovarustelun periaatteet	21
2.6 Korkeamman lohkovarusteluasteen rajoitukset	22
3 Simulointi ja mallinnus	24
3.1 Yleistä	24
3.2 Simulointi laivanrakennusteollisuudessa	26
3.2.1 Lohkotuotannon simulointimetodit	27
3.2.2 Lohkovarustelun mittarit	29
4 Menetelmä lohkovarustelun hyvyyden mittaamiseksi	32
4.1 Lohkovarustelun hyvyyden mittari	32
4.2 Menetelmän kuvaus	32
4.2.1 Varustelutyön työaikakertoimien määrittäminen	33
4.2.2 Laskentamallin luominen	34
4.2.3 Mallin kääntö, verifiointi ja validointi	37
4.2.4 Mallinnusajo ja analysointi	39

4.2.5	Dokumentointi ja raportointi.....	39
5	Case-tutkimus.....	40
5.1	Lohkovarustelu lohkotoimittajalla	40
5.1.1	Lohkovarustelun vaihtoehtoiset toimintatavat	40
5.1.2	Helsingin telakan nykytilanne.....	42
5.1.3	Tutkittavat lohkotoimitusmallit.....	44
5.1.4	Lohkotoimitusmallien rakennustavat	48
5.2	Lohkotoimitusmallin vaikutus varustelun tunteihin.....	51
5.2.1	Laskentamallin lähtömuuttujien määrittäminen	52
5.3	Tulokset	53
5.4	Tulosten herkkyyden arviointi.....	56
5.4.1	Työaikakertoimet	57
5.4.2	Varustelutoiminnot.....	60
6	Pohdinnat	64
6.1	Laskentamenetelmän epävarmuuden tarkastelu	64
6.2	Lohkotoimitusmallit kokoonpanotelakkakonseptissa	65
6.3	Lohkotoimitusmallien riskit	66
6.4	Tulosten vertailu aikaisempaan tutkimukseen.....	67
7	Yhteenveto ja johtopäätökset	69
8	Lähdeluettelo.....	73
	Liitteet	79

Lyhenteet ja termit

AHS	Arctech Helsinki Shipyard
EML	Ennen maalausta lohkoon asennettava varustelu
EMS	Ennen maalausta runkolohkoon asennettava varustelu
EMV	Ennen maalausta runkolohkoon Helsingin telakalla tehtävää varustelua
FSG	Flensburger Schiffbau-Gesellschaft on telakka Saksan Flensburg:ssa
JML	Jälkeen maalauksen lohkoon asennettava varustelu
JMS	Jälkeen maalauksen runkolohkoon asennettava varustelu
JOT	Juuri oikeaan tarpeeseen
KT	Kokonaistoimitus
KPT	Kokoonpanotelakka
LVAS	Lohkotyökuva
LVI	Lämpö, vesi ja ilma
MAS	Runkolohkomaalaus
NOK	Lohkokuljetus telakalle
NOR	Runkolohkon nosto rungonkoontipaikalle

TEL	Lohkokoonti
TEO	Osavalmistus ja –koonnit
TES	Runkolohkokoonti
TYS	Työnsuunnittelu, runko
USC	United Shipbuilding Corporation on Venäjän suurin meriteollisuuskonserni
VAS	Valmistussuunnittelu
Aluevarustelu	Laivan rungonkoonnin yhteydessä ja vesillelaskun jälkeen tehtävää varustelutyötä laivan eri alueilla
Esivalmistus	Laivaan asennettavan varustelumateriaalin tuottamista pajoilla
Koneikkovarustelu	Varusteen valmistus ja asennus varusteyksikköön työpajalla ennen koneikon nostoa laivaan tai lohkoon
Konetorni	Pumppuhuoneesta, konehuoneesta ja konekuilusta koostuva laivan rakennekokonaisuus
Kriittinen polku	On niiden peräkkäin suoritettavien toimintojen joukko, joiden myöhästyminen viivästyttää koko projektin aikataulua
Kuumavarustelu	Kuumavarustelu tarkoittaa laivanvarustelutyötä, missä syntyy korkeaa lämpöä. Esimerkiksi hitsaaminen on kuumavarustelutyötä
Lean	Japanilainen tuotantofilosofia, joka pyrkii poistamaan kaiken ylimääräisen tuotannosta

Lohko	Lohkoksi kutsutaan teräsrakenneyksikköä, joka koostuu vähintään kahdesta toisiinsa yhdistetystä runkorakenteesta
Lohkovarustelu	Kaikki lohossa tehtävä varustelutyö ennen lohkon liiittämistä osaksi laivan runkoa rungonkoontipaikalla
Läpimenoaika	Tarkoitetaan aikaa, joka kuluu toiminnon tai toimintojen sarjan aloittamisesta viimeisen toiminnon päättymiseen
Moduuli	Ryhmä varusteita, laitteita ja koneita, jotka on suunniteltu käsiteltäväksi yhtenä toiminnallisena yksikkönä
Prosessi	Tarkoitetaan eri toimintojen sarjaa, joka johtaa tiettyyn lopputulokseen
Pullonkaula	Tuotantoteollisuudessa pullonkaulaksi kutsutaan yksittäistä toimintoa, joka rajoittaa koko tuotantosysteemin tehokkuutta
Toimitusketju	Toimitusketju on verkko yksiköitä, yrityksiä ja organisaatioita, joiden läpi materiaali kulkee jalostuen valmiiksi tuotteeksi

1 Johdanto

1.1 Tutkimuksen taustaa

Maailman meriteollisuusmarkkinat elävät globaalissa myllerryksessä, minkä seurauksena laivanrakennusalalla on käynnissä hidas, mutta voimakas rakennemuutos. Laivanrakennustelakoilla on maailmanlaajuinen ylikapasiteetti, mikä on johtanut erittäin kovaan ja osin epäterveeseen kilpailuun. Vuoden 2008 rahoituskriisin seurauksena telakoiden tilauskanta koki romahduksen, mikä johti suuriin vaikeuksiin alalla. Tilaukskannan hiipussa Arctech Helsinki Shipyard joutui miettimään uutta markkinastrategiaa ja segmentoitumista telakkateollisuudessa.

Ilmaston lämpeneminen, Helsingin telakan venäläinen omistuspohja, arktisten työlaivojen kasvava kysyntä ja Helsingin telakan jäänmurtajien rakennushistoria luo positiiviset tulevaisuuden näkymät jäätämurtavien työlaivojen rakentamiselle Helsingissä. Ilmaston lämpenemisen seurauksena pohjoisten merialueiden jääpeite on pienentynyt, mikä mahdollistaa öljyn etsimisen yhä pohjoisemmasta ja kasvattaa arktisten laivojen kysyntää (Johansson, 2013). Helsingin telakka on historiansa puolesta vahva kilpailija arktisten työalusten markkinoilla, koska siellä on rakennettu noin 60 % koko maailman jäänmurtokalustosta (Arctech, 2014).

Helsingin telakalla rakennettavien työalusten varustelun kriittinen polku kulkee projektin alusta loppuun konealueilla kuten pääkonehuoneessa, konekuilussa ja ruoripotkurimoottorihuoneessa. Tehokkaammalla lohkovarustelun teettämisellä kyseisillä alueilla voidaan varustelutyön kokonaisläpimenoaika lyhentää, mikä luo kilpailuetua sekä kustannustehokkuutta. Telakan yksi vaihtoehto kilpailukyvyn parantamiseksi onkin varustelun kehittäminen. Erityisesti lohkovarusteluasteen nostamisella ja varustelun moduolinnalla saadaan työtä siirrettyä pois laivasta ja tästä syystä kustannustehokkuutta nostettua ilman suuria investointeja tuotantotiloihin, koneisiin tai työkaluihin.

Helsingin telakan tuotantostrategian mukaisesti lohkot hankitaan kansainvälisiltä telakkamarkkinoilta, koska telakalla ei ole omaa lohkotuotantoa. Tämän seurauksena suurin osa lohkovarustelusta tulisi tehdä lohkotuottajan tiloissa. Lohkot toimitetaan lohkotuottajalta Helsingin telakalle hinaajan vetämän proomun päällä. Lohkovalmistuksen ulkoistaminen kansainvälisille telakkamarkkinoille on osa Helsingin telakalla käytössä

olevan kokoonpanotelakkakonseptin tuotantostrategiaa. Kyseisen konseptin perusajatuksena on telakan keskittyminen omiin ydinosamisalueisiin, kuten projektinjohtoon ja hallintaan.

Kokoonpanotelakkakonseptia soveltavalla telakalla lohkojen toimitusvarmuus ja koordinointi on yksi ydinkysymyksistä. Esimerkiksi tämän hetkisen tuotantoennusteen perusteella Helsingin telakalla tulee olemaan vuoden 2015 ensimmäisellä neljänneksellä yhtäaikaaisesti 48 lohkoa valmisteilla AHS:lla sekä lohkotoimittajilla Euroopassa ja Venäjällä. Tällöin lohkovarustelun kannalta kriittisten valmistussuunnitelmien täytyy olla ajallaan valmiita ja lohkovarustelun tuotannon ohjauksen hyvin koordinoitua. Varustelun standardisoinnista tulee kehittää entisestään, jotta suunnittelun kuormitusta saadaan kevennettyä pitkällä aikavälillä. Tasaisella varusteluvoimalla toimittajatelakoiden työsuunnittelu ja ohjaus yksinkertaistuvat. Tämä vaikuttaa pullonkaulojen syntyyn ja tuotannon tehokkuuteen sekä tuo joustavuutta varustelutyöhön.

Tässä työssä keskitytään tarkastelemaan lohkotoimittajalla tai vaihtoehtoisesti Helsingin telakalla suoritettavan lohkovalmistuksen, lohkovarustelun ja aluevarustelun keskinäisiä riippuvuuksia ja löytämään tehokkain tapa valmistaa ja varustella konealueiden lohkoja varustelun kokonaisuudesta ja kustannustehokkuutta peilaten. Näiden toimenpiteiden avulla uudisrakennusprojektien lohkovarusteluaste pyritään maksimoimaan telakan kilpailukykyisyyden parantamiseksi.

1.2 Tutkimusongelma ja tavoitteet

Tutkimuksen ongelmaksi on asetettu jäätämurtavan työlaivaprojektin lohkovarustelun tehokkuuden nostamisen keinot kokoonpanotelakkakonseptissa. Työtehokkuuden nostamisen tutkimiseksi työssä luodaan malli lohkovarusteluasteen hyvyden mittaamiseksi. Luotuun mittariin perustuen työssä kehitetään laskentamalli, jonka avulla vertaillaan viittä eri lohkotoimitusskenaariota Helsingin telakalla. Tarkastelun avulla tutkimuksessa selvitetään varustelutyön kannalta kustannustehokkain ja työn kestoltaan lyhin toimintamalli. Tähän päästään tekemällä varusteluun liittyvät toiminnot oikeaan aikaan, oikeassa paikassa ja oikealla tavalla verkottuneessa toimintaympäristössä.

Työ perustuu kirjallisuustutkimukseen, asiantuntijahaastatteluihin ja telakalta saataviin tuotannon työtunteihin sekä näiden pohjalta luotuun laivan varusteluprosessin lasken-

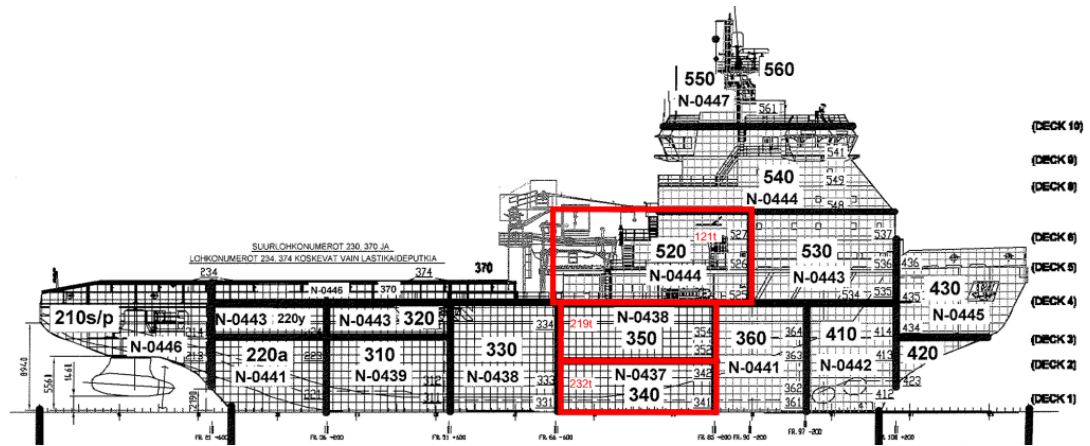
tamalliin. Lohkovarustelun lisäämiseksi työssä tutkitaan mahdollisuuksia varustelun moduloinnin kasvattamiseksi lohkojaon ja rakennustavan muutoksilla. Kirjallisuustutkimuksen ja telakan tietokannan avulla etsitään varustelun keston mittaamiseksi luotettavaa laskentamallia sekä määritetään työn kannalta sopivin lohkovarustelun hyvyyden mittari. Kehitetyn laskentamallin avulla vertaillaan eri lohkotoimitusmallien toimivuutta kokoonpanotelakkakonseptissa case- tutkimuksen perusteella.

Tutkimuskysymys on seuraava; **miten lohkovarustelun hyvyyttä mitataan ja minkälaisia lohkoja tulee kokoonpanotelakkakonseptia soveltavalle ja työaluksia valmistavalle telakalle toimittaa varustelun tehokkuuden maksimoimiseksi?**

1.3 Työn raja

Työ rajataan käsittelemään vain työlaivojen rakentamista koskevia periaatteita, mikä johtuu Helsingin telakan segmentoitumisesta kyseisten laivojen toimittajaksi. Laivaprojektin läpimenoajassa otetaan huomioon vain varusteluun liittyvät toiminnot, joten rungonkoonti rajataan tutkimuksen ulkopuolelle. Lisäksi käyttöönotto ja merikokeet rajataan tutkimuksen ulkopuolelle. Tutkimuksen avulla toimintoja pyritään kehittämään ilman investointitarpeita eikä mahdollisten lohkotoimittajatelakoiden tuotantokapasiteetteja huomioida.

Työn tutkimuksessa keskitytään työalusten konealueiden lohkovarusteluun, koska ne esiintyvät projektiaikataulun kriittisellä polulla. Konealueita kuvataan tutkimuksessa konetorniajattelutavan mukaisesti. Konetorniajattelutapa tarkoittaa pumppuhuoneesta, konehuoneesta ja konekuilusta koostuvaa tornia, joka ajatellaan yhtenä rakenteellisena kokonaisuutena johtuen varustelutyön limittymisestä kyseisessä tornissa. Esimerkki erään uudisrakennusprojektin konetornista on esitetty kuvassa 1. Konetorni on punaisilla ääri viivoilla merkatuista lohkoista koostuva rakennekokonaisuus. Konetornista rajataan ulos konekuilun ylin osa, koska konekuilun varustelutyö painottuu lohkoon 520.



Kuva 1 Erään uudisrakennusprojektin konetorni

Modulaarisen varustelun myötä suunnittelun työmäärä kasvaa lyhyellä aikavälillä (Baade, et al., 1998). Tästä syntyvä laivaprojektin mahdollinen lisäkustannus on kuitenkin rajattu tutkimuksesta pois, koska työssä keskitytään tuotannon välittömiin kustannuksiin. Tuotannon välittömistä työtunneista jätetään tutkimuksen ulkopuolelle toimihenkilöiden eli työnjohtajien ja työnsuunnittelijoiden työtunnit. Tutkimuksessa oletetaan, että jokainen tehty työtunti on tehokkuudeltaan samanarvoinen. Työntekijöiden työtehokkuus pysyy siis vakiona koko laivaprojektin ajan. Lohkokoonnin siirtymisestä halvemman työvoiman lohkotoimittajalta Helsingin telakalle johtuvaa mahdollista terästyön hinnannousua ei tutkimuksen laskentamallissa oteta huomioon.

2 Tuotantoprosessi kokoonpanotelakalla

Tämä luku kuvaa laivan tuotantoprosessia kokoonpanotelakalla kirjallisuuteen pohjautuen. Luvun tarkoituksena on perehdyttää lukija kokoonpanotelakan toimintaan sekä telakan teräs- ja varustelutuotantoon sekä niissä esiintyviin haasteisiin. Tämän tarkastelun avulla selvitetään, mitä kokoonpanotelakkakonseptin tuotantoprosessiin soveltuvia tekijöitä on tähän mennessä kirjallisuudessa tarkasteltu. Luku jakautuu kolmeen osaan; ensimmäisessä osiossa läpikäydään kokoonpanotelakan toimintaa ja sen tavoitteita sekä toimitusketjua kokoonpanotelakkakonseptissa. Toisessa osiossa kuvataan laivan rakennustapaa kyseisessä konseptissa ja määritetään lohkotyytit sekä lohkojen hierarkiaa. Kolmannessa osiossa kuvataan lohko- ja varustelutuotantoa sekä perehdytään lohkovarustelun hyötyihin ja rajoituksiin.

2.1 Kokoonpanotelakan toiminta

Nykyisen toimintatavan mukaisesti telakka on kokoonpanopaikka, missä telakan henkilöstö, alihankkijat ja ulkopuoliset toimittajat rakentavat yhdessä laivan (Holmström, 1997). Alihankinnan käytöllä mahdollistetaan yrityksen keskittyminen oman toiminnan osaamis- ja ydinalueeseen (Anttila, 2012). Telakan toiminnot keskittyvät projektin kokonaisvaltaiseen hallintaan ja laivaprojekteissa yleisesti toistuviin työvaiheisiin. Näissä työvaiheissa telakan oman henkilöstön tulee olla tuottavuudeltaan ja ammattitaidoltaan alihankkijoita edellä. (Holmström, 1997) Kokoonpanotelakan (KPT) perusajatuksena on telakan omiin ydinosaa-alueisiin keskittyminen. Tästä syystä KPT- konseptia soveltava telakka keskittyy projektin johtoon ja hallintaan. Tähän kuuluu tuotannonsuunnittelu ja -ohjaus, rakentamistyön organisointi ja valvonta sekä alihankkijoiden tuotannon tahdistaminen. (Niemelä, 2005)

Kokoonpanotelakkakonseptin ensisijainen tavoite on laivaprojektin kustannustehokkuuden ja kilpailukyvyn parantaminen sekä läpimenoajan lyhentäminen. Konseptin avulla telakan pääomakuluja, yleiskuluja ja vakuutusmaksuja saadaan pienennettyä. Erityisen suurta hyötyä saadaan kiinteiden kustannusten vähentymisestä, joka johtuu oman työvoiman ja pääomaa sitovien toimintojen supistamisesta telakalla. Näin toimimalla kiinteistä kustannuksista saadaan muokattua muuttuvia kustannuksia, mikä parantaa telakan toimintakykyä tuotannon kuormituksen ollessa vähäistä. (Niemelä, 2005)

KPT- konseptissa välivarastoinnista luovutaan siirtymällä synkroniseen rakennustapaan. Työvaiheiden välillä ei ole pitkiä odotusaikoja, mikä osaltaan virtauttaa tuotantoa. Odotusaikojen lyhentämisellä saavutetaan sitoutuneen pääoman pienentyminen prosessissa. Tähän päästään, koska keskeneräisen tuotannon määrä vähenee. Tätä toimintatapaa voidaan kutsua JOT (juuri oikeaan tarpeeseen) tuotannoksi, mikä on yksi osa Lean-tuotantofilosofiaa. Lean-filosofian mukainen laivanrakennus tarkoittaa kustannusten vähentämistä eliminoimalla tuotannosta turhat, ei arvoa lisäävät prosessit ja välivarastot (Phogat, 2013).

Lean- tuotanto riippuu kokoonpanotelakan toiminnan lisäksi myös telakan ja toimittajien välisestä integraatiosta. Tällöin voidaan puhua joustavasta arvoketjusta. Joissain tapauksissa on välttämätöntä ja kustannustehokasta hankkia kootut suurlohkot alihankintaverkostosta. Tässä tapauksessa lohkot täytyy saada lohkotoimittajalta ennaltamäärätyssä ja tarkassa aikataulussa - juuri oikeaan tarpeeseen. Suurien välivarastojen välttämiseksi kaikkia laivan lohkoja ei kannata kotiuttaa lohkotoimittajalta samanaikaisesti. Esimerkiksi Japanilaiset telakat ovat tilanneet kokonaisia kansirakennuksia toimitusverkostosta juuri oikeaan tarpeeseen. (Liker & Lamb, 2002) Eräät Eurooppalaiset telakat tilaavat toimittajilta varusteltuja runkolohkoja korkeilla aikatauluvaatimuksilla tuotannon tarpeiden mukaisesti (Phogat, 2013).

Kokoonpanotelakkakonseptissa telakka on hyvin riippuvainen alihankkijoista ja alihankintasuhteista. Suurten kokonaisuuksien tilaaminen toimitusverkostosta vaatii tilaajalta korkeaa luottamusta ja toimittajan toimintatapojen tuntemista, jotta voidaan varmistua tilausten toimitusvarmuudesta ja huomataan mahdolliset ongelmat ajoissa. (Liker & Lamb, 2002)

2.1.1 Alihankintasopimukset laivanrakennuksessa

Telakoilla teetetyn kyselyn pohjalta (Schank, et al., 2005) voidaan todeta alihankintaa käytettävän kahdella eri tapaa laivanrakennusteollisuudessa: kokonaisalihankintana ja kuormitusalihankintana. Kokonaisalihankinnalla tarkoitetaan laivanrakennuksessa kokonaisten funktionaalisten tehtävien ulkoistamista alihankkijayritykselle. Funktionaalisia kokonaisuuksia ovat esimerkiksi lohkokoonti, laivan ilmastointi ja maalaus. Kokonaisalihankintaa käytettäessä telakka voi tarjota omia tuotantotilojaan tai materiaalejaan ja laitteitaan alihankkijalle. Kokonaisalihankintatoimittajia on kahta tyyppiä: kokonaistoimittaja tai osakokonaistoimittaja. Kokonaistoimitukseen kuuluvat suunnittelu, mate-

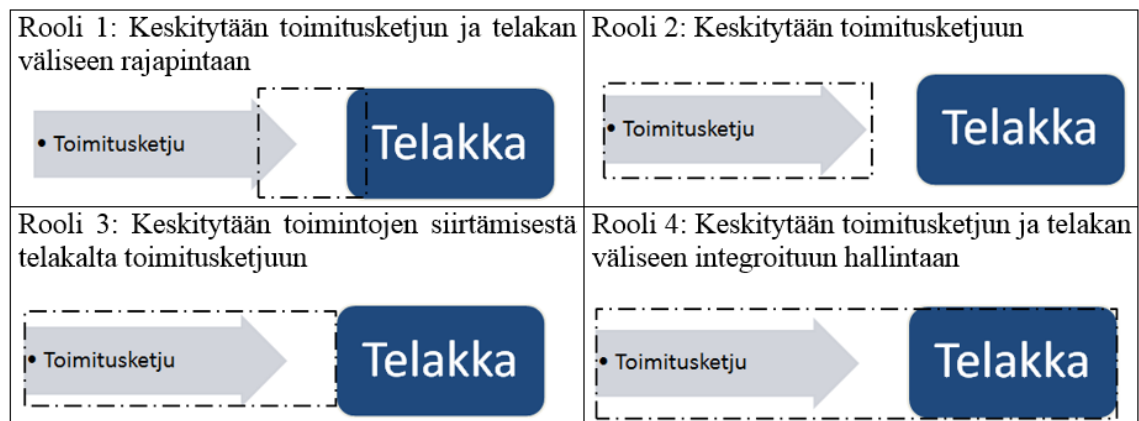
riaalit, laitteet ja kaikki asennustyö. Osakokonaistoimitus koostuu jostakin yhdistelmästä suunnittelua, materiaaleja, laitteita ja tuotantotiloja.

Kuormitusalihankintaa käytetään telakan tuotantotarpeen ylittäessä telakan oman tuotantokapasiteetin esimerkiksi rinnakkaisten laivaprojektien aikana. Kuormitusalihankintaa voidaan myös käyttää projektin aikataulun kiinni kuromiseksi. (Schank, et al., 2005)

Suurin osa Euroopan telakoista käyttää kokonaisalihankintaa laajalti. Esimerkiksi saksalaisen Meyer Werft telakan alihankinta-aste laivaprojektille voi olla jopa 75 % (Meyer Werft, 2010). Tästä syystä useat eri tahot ottavat osaa laivanrakennusprojektiin. (Schank, et al., 2005; Emblemståg, 2014) Tässä työssä keskitytään pääasiassa kokonaisalihankintaan, joka on lohkokoontia ja lohkovarustelua lohko toimittajan tuotantotiloissa.

2.1.2 Toimitusketjun kehitys KPT- konseptissa

Toimitusketjun kehittämisessä voidaan tunnistaa neljä roolia. Roolit tunnistetaan sen mukaan mihin asioihin toimitusketjun edistämiprojektissa keskitytään. Kuvassa alla (kuva 2) on esitetty toimitusketjun kehittämisen neljä roolia laivanrakennukseen sovellettuna.



Kuva 2 Toimitusketjun neljä roolia KPT- konseptissa (Koskela & Vrijhoef, 2000)

Ensimmäisessä roolissa kehittämiskohteena on telakan ja tavarantoimittajien välisten toimintojen tehostaminen ja yhteistyö. Tämän kehitysprojektin tarkoituksena on varmistaa tasainen materiaali- ja työvoimavirta telakalle toimitusketjun aikaisemmista tehtävistä.

tä. Osa-alueen yhtenä kehityskohteena voidaan mainita telakan ja alihankkijoiden keskinäisten suhteiden parantaminen. (Lauren, et al., 2003)

Toinen rooli keskittyy toimitusketjun kehittämiseen minimoimalla kustannukset logistiikan, varastoinnin ja läpimenoajan suhteen. Tähän päästään tehostamalla toimitusverkon toimintaa. (Lauren, et al., 2003)

Kolmannessa roolissa siirretään toimintoja telakalta toimitusketjun alkupäähän. Tämän avulla pyritään vähentämään koko laivaprojektin läpimenoaika, saavuttamaan laatuparannuksia ja vähentämään kustannuksia. Tähän päästään kasvattamalla esivalmisteiden ja valmiiden kokoonpanojen osuutta. (Lauren, et al., 2003)

Viimeinen kehitysmalli, rooli neljä, pyrkii integroimaan koko toimitusketjun tehokkaaksi tuotantoprosessiksi. Tämä vaatii koko toimitusketjun kehittämistä systemaattisesti ja johdetusti. Tällöin ylimmän tason suunnitelmista ja strategiasta vastaa telakka. (Lauren, et al., 2003)

Tässä tutkimuksessa liikutaan toimitusketjun kehitysmallin roolien numero kolme ja neljä rajapinnassa. Työssä syvennytään laivan lohkovarustelun tehostamiseen lohkoitoimittajalla eli toimitaan roolin kolme mukaisesti. Rooli neljä tulee kysymykseen, kun tutkitaan minkälaisia lohkokokonaisuuksia tulisi toimitusverkostosta hankkia koko laivan lohkovarusteluprosessin tehostamiseksi.

2.2 Rakennustapa

Laivanrakennusprosessi laivan tilauksesta luovutukseen voidaan jakaa suunnittelu- ja valmistusvaiheeseen (Kim, et al., 2005). Laivasopimuksen jälkeinen suunnittelu sisältää perussuunnittelun ja valmistussuunnittelun. Perussuunnittelun aikana määritetään laivan rakennustapa, alue- ja lohkojako sekä aikataulut. Tämän lisäksi laivan yleisjärjestely, järjestelmien, tilojen ja rungon suunnittelu esitetään tilaajalle, viranomaisille ja luokituslaitokselle. Tämä prosessi kestää laivatyyppistä riippuen muutamia kuukausia. (Kosola, 1997) Tyypillisesti jäätämurtavan työaluksen prototyypin perussuunnittelu kestää noin 12 kuukautta (Nousiainen, 2014).

Valmistusvaihe koostuu karkeasti kahdesta osasta, rungon rakentamisesta ja varustelusta. Modernin laivanrakennustavan mukaisesti laivan runko kootaan moduuleista. Rakenteelliset yksiköt kootaan yhteen suuremmaksi kokonaisuudeksi, jota kutsutaan lohkoksi. Lohkoista koottua kokonaisuutta kutsutaan suurlohkoksi. Maalatuista suurlohkoista lopulta kootaan laivan runko rakennusaltaalla. (Schank, et al., 2005) Tätä prosessia pidetään pullonkaulana telakoilla (Tokola, et al., 2014).

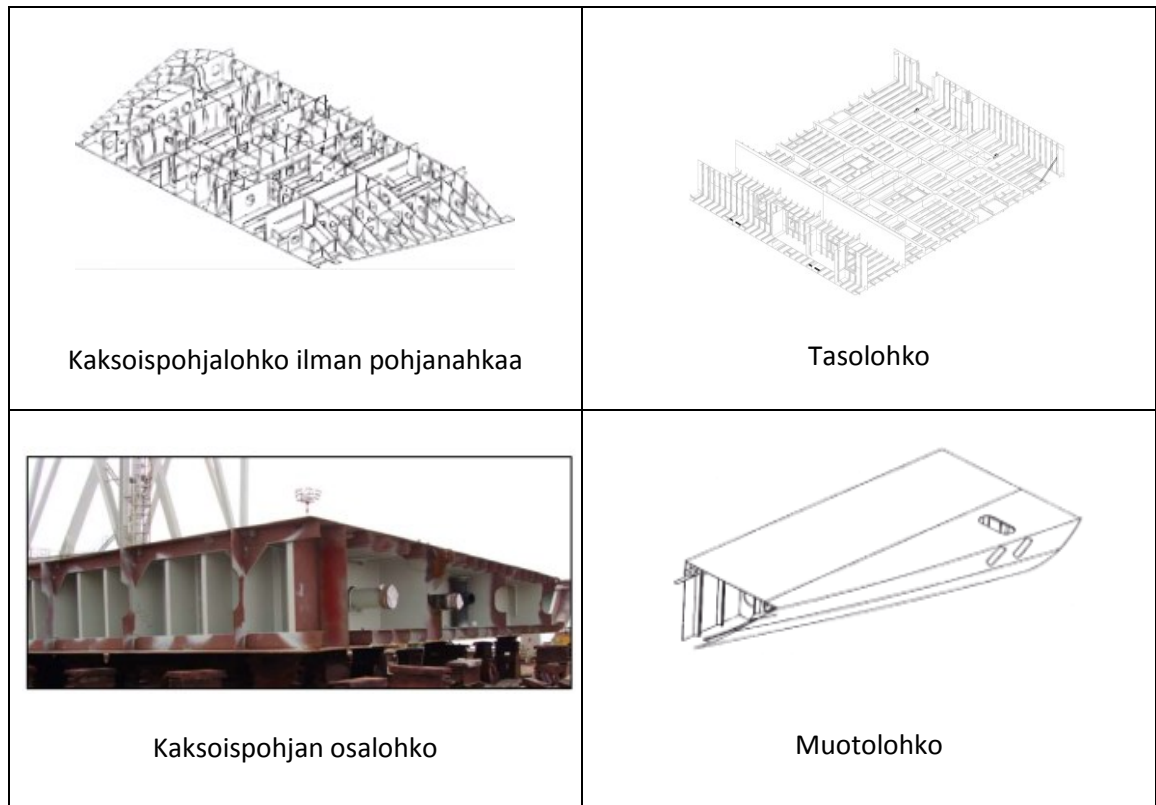
Rungon rakentamisessa käytetään telakoilla seuraavaa kolmea koontitapaa tai niiden yhdistelmiä: (Gustafsson, 1997)

1. Koonti avaruuslohkoista
2. Koonti suurlohkoista
3. Koonti rengaslohkoista

Avaruuslohkoilla tarkoitetaan esimerkiksi kaksoispohjaa, laidoitusta tai kantta alla olevine laipioineen. Rengaslohkoksi kutsutaan rungon poikkileikkauksen käsittävää viipaletta, joka koostuu useasta tavanomaisesta osalohkosta. (Rubesa, et al., 2011; Gustafsson, 1997)

2.2.1 Lohkojen määrittäminen

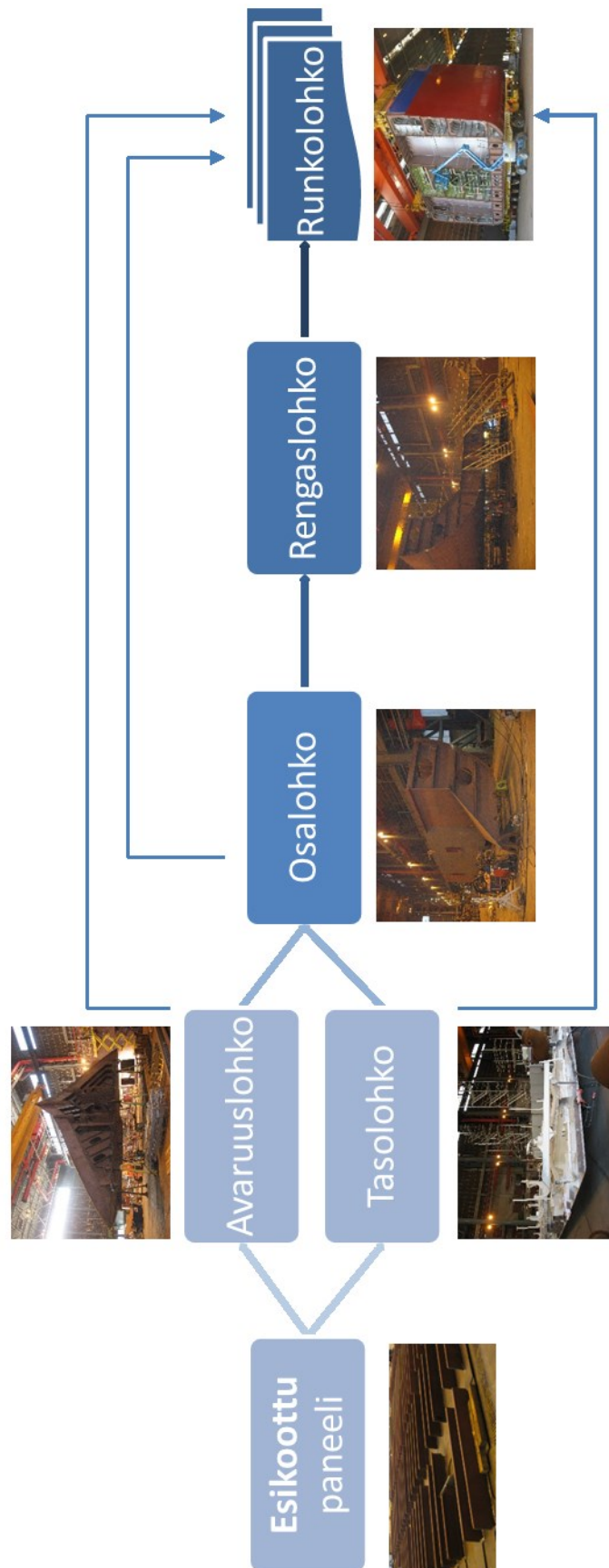
Tasolohko kuvataan tyypillisesti kansirakennuksen lohkoina, jotka muodostuvat kannesta ja siihen hitsattavista laipioista ja laidoitusrakenteista. Muotolohkot eli avaruuslohkot ovat puolestaan laivan keula- ja peräosien sekä rungon alapuolisten rakenteiden muodostamia lohkoja. Lohkot koostuvat kaarevista laidoituslevyistä sekä niihin kiinnitetyistä kansilevystä. Kaksoispohjalohkot muodostuvat tankinkannen, pohjanahan ja kaarijärjestelmän muodostamasta rakenteesta. (Ozkok & Helvacioğlu, 2013) Kuvassa 3 on esitetty esimerkit kaksoispohjan lohkoista ilman pohjanahkaa, tasolohkosta, kaksoispohjan osalohkosta ja muotolohkosta.



Kuva 3 Erilaisia lohkotyyppejä

Suurlohko on käsitteenä yleinen ja voi tarkoittaa mitä tahansa vähintään kahdesta osalohkosta koottua teräsmoduulia. Suurlohko termi rinnastetaan yleisesti telakan nostokapasiteettiin. Koska nostokapasiteetit telakoiden välillä voivat vaihdella sadoilla tonneilla, voi esimerkiksi 500 tonnin painoinen teräsmoduuli olla toisella telakalla osalohko ja taas toisella suurlohko. Tästä syystä, kirjallisuudesta poiketen, tutkimuksessa termi suurlohko korvataan runkolohko käsitteellä. Runkolohkolla tarkoitetaan tässä työssä laivan runkorakenteen teräsmoduulia, joka liitetään rungonkoontipaikalla, kuten rakennusaltaalla, osaksi rakenteilla olevaa laivan runkoa.

Tässä tutkimuksessa käytettävien teräsrakenneyksiköiden hierarkiapuu on esitetty kuvassa 4. Runkolohko muodostuu osalohkoista, jotka kootaan avaruuslohkoista ja tasolohkoista. Osalohkoista valmistetun teräsrakenteen käsittäessä laivan rungon poikkeileikkauksen kutsutaan muodostunutta rakennetta rengaslohkoksi. Avaruuslohko ja muotolohko tarkoittavat tässä tutkimuksessa samaa lohkotyyppiä, kuten kappaleessa 2.2.1 on todettu. Avaruus- ja tasolohkot kootaan esikootuista paneeleista. Tässä tutkimuksessa lohkot määritetään niiden funktioon perustuen. Esimerkiksi avaruuslohkostakin muodostuu runkolohko, kun se nostetaan rakennusaltaalle. Tämä tarkoittaa, että kaikki runkoon rungonkoontivaiheessa liitettävät teräsrakennemoduulit ovat runkolohkoja.

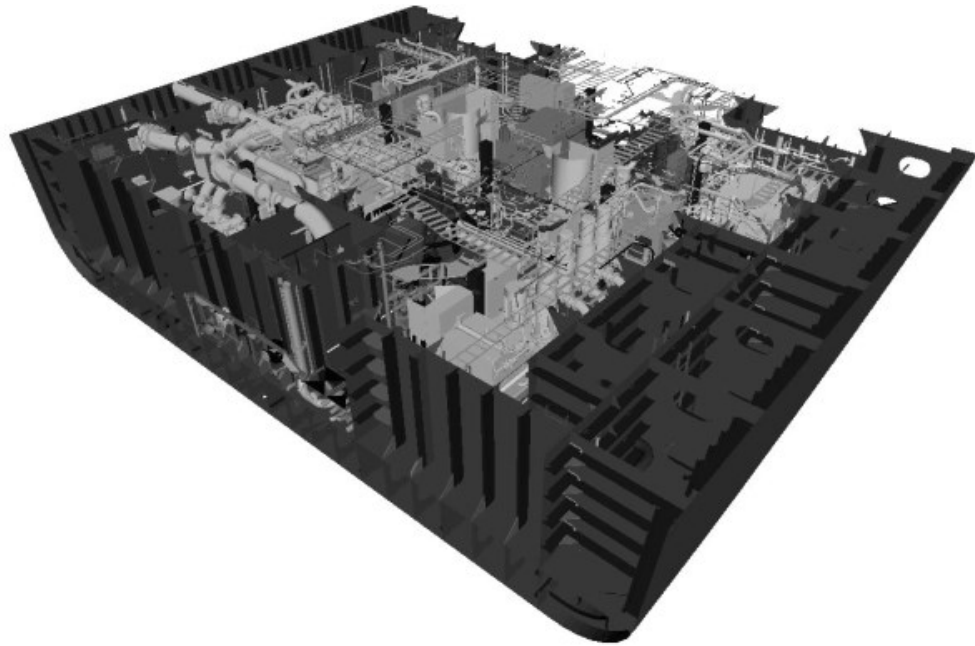


Kuva 4 Teräsmoduulien hierarkia

2.2.2 Lohkojaossa huomioitavat tekijät

Uudisrakennusprojektin optimoitu lohkojako ja -koko ovat avaintekijöitä laivaprojektin tuottavuuden kannalta. Lohkot tulisi suunnitella ottaen huomioon lohkokoonnin, runkolohkokoonnin, lohkovarustelun ja maalauksen vaatimukset (Storch, et al., 1995). Runkolohkojen rajoittavia tekijöitä ovat telakan tuotantotilojen asettamat rajoitukset. Rajoittavia tekijöitä ovat esimerkiksi nostokapasiteetti rakennusaltaalla ja varusteluhallien mitat. Lohkon varustelu on riippuvainen lohkon muodosta ja lohkokuljetuskalustosta. Runkolohkojen koon maksimoiminen on yksi osatekijä onnistuneeseen varusteluun jo lohkovaiheessa. (Bunch, 1995) Lohkokokonaisuuksien kasvaessa vähenee lohkorajojen muodostamat rajoitukset varustelutyön tekemiselle. Varusteltu runkolohko ei kuitenkaan saa ylittää telakan nostokapasiteettia rakennusaltaalla (Wei, 2012).

Onnistunut lohkovarusteluprosessi on siis riippuvainen laivan lohkojaon toteutuksesta. Lohkorajat tulee suunnitella niin, että suurimmat laitealustat eivät jää lohkorajan sijainnin takia asentamatta lohkovaiheessa. Lohkojaon avulla pystytään myös vaikuttamaan varusteluaikaiseen työasentoon. Lisäksi lohkojen koko vaikuttaa lohkovarustelun onnistumiseen, koska suuremmat lohkot vähentävät lohkovarustelun rajoituksia. Esimerkki pumppuhuoneen avonaisesta runkolohkosta varusteineen on esitetty kuvassa 5. Kuvan runkolohko koostuu kaksoispohjan avaruuslohkosta sekä kahdesta poikittaisesta laipioista ja kahdesta päältä auki olevasta laitatankista. Pumppuhuoneen lohko on jätetty päältä auki lohkovarustelutyön tehokkuuden varmistamiseksi. Varustelun rajoituksiin ja lohkovarustelun tehokkuuteen vaikuttavia tekijöitä on kuvattu tarkemmin kappaleessa 2.5.



Kuva 5 Pumppuhuoneen runkolohko varusteineen (Arctech Helsinki Shipyard, 2014)

2.3 Lohkotuotanto

Lohkotuotanto käynnistyy osavalmistuksella. Osavalmistuksessa valmistetaan laivan rungon rakenneosat myöhempiä lohkotuotannon vaiheita varten. Rakenneosat valmistetaan yleensä pohjamaalatusta teräsmateriaalista. Osavalmistus koostuu kuudesta eri toiminnosta: teräksen esikäsittelystä, profiiliosien-, levyosien-, T-palkkien-, osakoottien- ja kansien valmistuksesta.

Osavalmistuksen jälkeistä työvaihetta kutsutaan lohkokoonniksi. Lohkokoonti voidaan luokitella kolmeen prosessiin kyseisessä vaiheessa koottavan lohkotyyppin perusteella. Nämä prosessit ovat tasolohko-, muotolohko- ja kaksoispohjalohkokoonti. (Ozkok & Helvacioğlu, 2013).

Lohkoista kootaan telakan tuotantohalleissa runkolohkoja. Runkolohkokoonti alkaa ylösalaisin olevien tasolohkojen käännöllä oikein päin valmistuspaikalla. Tämän jälkeen valmiita ja EML (Ennen Maalausta Lohkoon) varusteltuja lohkoja liitetään yhteen runkolohkoksi.

Tässä tutkimuksessa käsiteltävässä KPT- konseptissa osa- ja lohkovalmistus tehdään ensisijaisesti lohkotuotantotiloissa.

2.4 Varustelu

Telakoiden painopiste on siirtynyt puhtaasta teräksen muotoilusta ja asennuksesta kohti laaja-alaista varustelutyötä. Euroopassa rakennettavien uudisrakennusprojektien varustelutyö edustaa yhä suurempaa osaa laivaprojektin kokonaiskulurakenteesta. (Wei & Nienhuis, 2010)

Varustelu voidaan jakaa lohkovarusteluun ja aluevarusteluun (Wei, 2012). Tässä työssä sanalla varustelu tarkoitetaan yleisesti molempia. Aluevarusteluvaihe alkaa kun runk-lohko on liitetty rakennusaltaalla rakennettavaan laivan runkoon. Tätä ennen kaikki varustelutyö, joka tehdään taso-, osa- ja runk-lohkoihin, on lohkovarustelua. (Holmström, 1997) Varustelu voidaan jakaa neljään perusvaiheeseen, jotka on listattu vaiheen mukaisesti (Johnson, 1979; Rubesa, et al., 2011):

- Koneikkovarustelu. Väliaikaisen tuotteen asennus, joka koostuu valmistetuista ja hankituista komponenteista.
- Lohkovarustelu. Varustelukomponenttien, jotka voivat sisältää koneikon, asennus runkorakenteeseen tai lohkoon ennen lohkon nostoa rungonkoontipaikalle liitettäväksi laivan runkoon.
- Aluevarustelu. Minkä tahansa varustelumateriaalin tai koneikkojen asentamista rungonkoonnin aikana tai sen jälkeen.
- Viimeistelyvarustelu. Varustelun asennusta ja testausta laivavaiheessa uudisrakennusprojektin vesillelaskun jälkeen.

Osa varustelutyöstä, kuten pääkoneiden asennus, voidaan tehdä vasta aluevarusteluvaiheessa. Toisaalta osa varustelumateriaalista voidaan asentaa missä tahansa edellä mainitussa varusteluvaiheessa. Yleisesti kaikki varustelutyö mitä on tehty ennen lohkon nostoa rakennusaltaaseen on kustannustehokkaampaa kuin työn tekeminen lohkonoston jälkeen (Tokola, et al., 2014). Rungonkoonti- ja käyttöönottovaiheessa tehtävä varustelu vaatii työntekijöitä liikkumaan rakennusaltaalla, varustelulaiturilla ja muissa tuotantotiloissa, mikä johtaa resurssihukkaan (Wei, 2012). Kuitenkaan ei ole selvää rajapintaa siihen, mitä

työvaiheita tulisi suorittaa lohkovarustelun aikana ja mitä aluevarusteluvaiheessa. Lyhyesti varustelun asennustyön vaihe riippuu seuraavista tekijöistä (Wei, 2012):

- Tuotannon aikataulu. Välitavoitteiden ja kovien pisteiden saavuttamiseksi laivanrakennusprojektissa, lohkokoonti- ja rungonkoontiaikataulut on muodostettu jo projektin alkuvaiheessa. Nämä aikataulut määrittelevät kuinka paljon lohkovarusteluvaiheelle on varattu aikaa.
- Tilan luoksepääsemättömyys. Osa varustelutyöstä on tehtävä lohkokoontivaiheessa, koska myöhemmissä vaiheissa työn teettäminen on aikaa vievää ja kallista.
- Telakan nostokapasiteetti. Tuotantotilojen kapasiteetti on lohkojen koon ja käsittelyn ydin. Suuri nostokapasiteetti on merkittävä etu, koska se mahdollistaa suurempien runkolohkojen valmistuksen. Tämä myös määrittää kuinka paljon työtä voidaan siirtää työpajoille.
- Materiaalien saatavuus. Oikea-aikainen materiaalien toimitus on yksi avaintekijöistä korkean lohkovarusteluasteen saavuttamiseksi. Tähän vaikuttaa oleellisesti suunnitteluajankäyttö.
- Lohkovalmistus asento. Esimerkiksi pääkonehuoneen katto osalohkoa voidaan varustella ensin ylösalaisin, jolloin kattoon tulevaa varustelua päästään tekemään jalkoasennossa.

Wei jättää yllä kuvatussa asennustyövaihelistassaan kokonaan mainitsematta kuumavarustelun yhtenä osatekijänä määritettäessä työvaiheen suorittamisajankohtaa. Suomen laivanrakennusteollisuudessa kuumavarustelutyön maksimointi ennen lohkomaaalausta on ollut jo pitkään yksi tärkeimmistä varustelutyön jaksottamisperiaatteista. Kuumavarustelutyön teettäminen maalatussa runkolohkossa rikkoo jo olemassa olevan maalipinnan ja kuumuudesta aiheutuva maalikäry on merkittävä työturvallisuusriski.

2.5 Lohkovarusteluprosessi

Lohkovarustelun päätavoitteita on laivan varusteluajan lyhentäminen, laivassa tehtävän työn minimoiminen, varustelutyön suunnittelun yksinkertaistaminen ja eri ammattiryhmien yhteentörmäyksen välttäminen (Holmström, 1997). Useimmilla maailman telakoilla toteutetaan lohkovarustelua. Lohkovarusteluasteessa esiintyy kuitenkin suurta hajontaa telakoiden välillä. Kirjallisuuden mukaan eräiden telakoiden laivaprojekteissa päästään yli 80 % lohkovarusteluasteeseen. (Schank, et al., 2005) Edellä mainittu lohkovarusteluaste (yli 80 %) perustuu eri telakoilla suoritetun kyselytutkimuksen tuloksiin. Tästä syystä siihen on syytä suhtautua pienellä varauksella. Massaräätlöidyissä laivaprojekteissa hyvänä lohkovarusteluasteena voidaan pitää noin 50 – 60 % (Gustafsson, 1997).

Lohkovarustelun avulla laivan läpimenoaikaa voidaan lyhentää limittämällä varustelu- ja terästyötä. Varustelutyön tekeminen edullisemmassa asennossa ja olosuhteissa sekä telakan laatutavoitteiden saavuttaminen parempien työolosuhteiden seurauksena ovat pääsyitä lohkovarustelun harjoittamiselle (Wei, 2012; Holmström, 1997). Työn vieminen pois laivasta nostaa työn tuottavuutta. Kirjallisuudessa esiintyy useita eri karkeita arvioita laivan asennustyömäärän vähenemisestä työn siirtyessä varhaisempaan vaiheeseen ja parempiin olosuhteisiin. Nämä työmäärien eri kertoimet on esitetty alla taulukossa 1 (Remes, 2013; Fafandjel, et al., 2008; Baade, et al., 1998; Schank, et al., 2005).

Taulukko 1. Asennustyömäärän väheneminen työvaiheen varhaisuuden perusteella

Työvaihe	Remes	Fafandjel	Baade	Schank
koneikkorakentaminen	1,0	1	1	1
moduulirakentaminen	1,2	1	1	1
tasolohkovarustelu	1,5	-	-	1
lohkovarustelu	2,0	3	2	2
aluevarustelu rungolla	4,0	5	4	4

Koneikko- ja moduulirakentamista pidetään tehtyjen tutkimusten perusteella tehokkaimpana menetelmänä laivanvarustelussa. Kuten taulukosta 1 huomataan, rungunkoonnin yhteydessä tehtävä varustelutyö voi viedä peräti viisi kertaa enemmän työtunteja kuin moduuli- tai koneikkovarustelu. Osa kirjallisuudesta jakaa lohkovarustelun vielä lohko- ja runkolohkovarusteluun (Baade, et al., 1998). Tässä

työssä kuitenkin lohkovarustelulla tarkoitetaan sekä lohossa, että runkolohkossa tehtävää varustelutyötä.

Nykyaikaisen uudisrakennusprojektin rakennustavan mukaisesti lohkovarustelu aloitetaan jo lohkokoonnin yhteydessä. Lohkovarustelulla on suuri vaikutus laivanrakennusaikaan ja tuotannon työtunteihin. Toivottu lohkovarusteluasteen nosto tarvitsee lohkojen pidempää varustelu-aikaa lohkovarusteluhalleissa. (Baade, et al., 1998) Lohkovarustelu yleisellä tasolla koostuu putkien asennuksesta, sähkökomponenteista, LVI komponenteista ja muista systeemikomponenteista kuten koneista, vinsseistä ja sähkökaapeista (Wei, 2012). Yleisesti lohkovarustelutyö tehdään hyvin varusteltujen työpajojen sisällä hyvässä valaistuksessa (Maffioli, et al., 2001). Näin toimimalla varmistetaan työn tehokkuus, hyvä työskentelyasento ja työturvallisuus, esimerkiksi alkupaloista koituvia riskejä. Siirtämällä varustelutyötä tuotannon aikaisempaan ajankohtaan, missä materiaalit ja laitteet ovat helposti saatavilla sekä lohkojen asento muunneltavissa, voidaan tuotannontehokkuudessa saavuttaa suuria etuja (Wei, 2012).

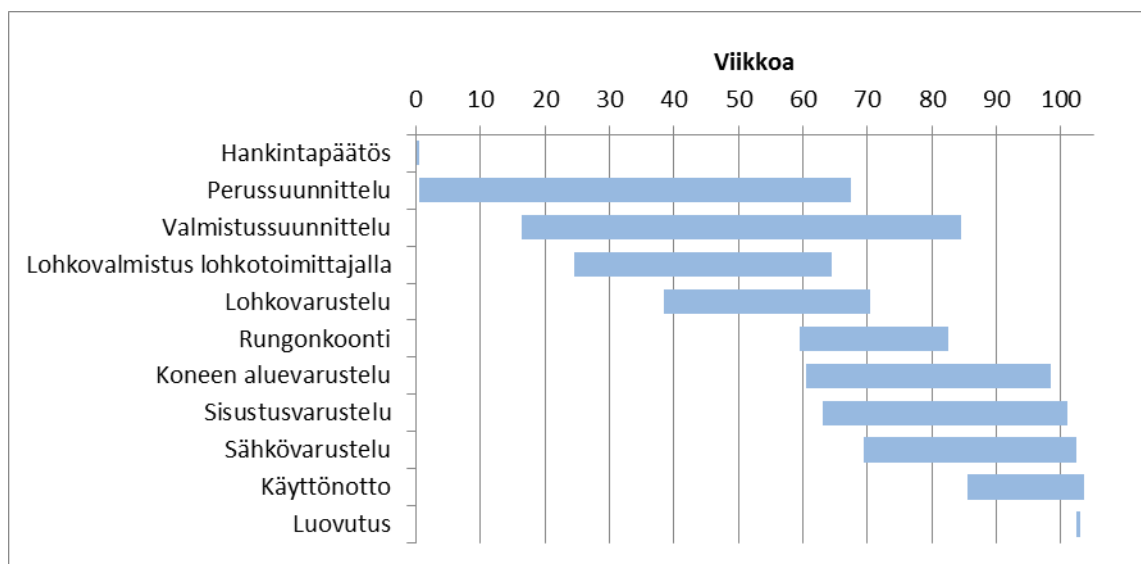
Lohkovarusteluun liittyvät varustelutoiminnot voidaan jakaa eri varustelujaksoihin perustuen niiden tekovaiheeseen kokoonpanoprosessissa. (Niemi, 2006)

- Esivalmistus
- Ennen maalausta lohkoon –varustelu (EML)
- Ennen maalausta runkolohkoon –varustelu (EMS)
- Jälkeen maalauksen lohkoon –varustelu (JML)
- Jälkeen maalauksen runkolohkoon -varustelu (JMS)

Kuvassa 6 on esitetty miten edellä kuvatut eri rungonkoonti- ja varustelutoiminnot sijoittuvat työlaivan rakennusaikataulussa. Laivanrakennusprojekti alkaa lohkotuotannolla lohkotuotantajan tuotantotiloissa. Tämän jälkeen pyritään aloittamaan lohkovarustelu tasolohkolinjalla edellyttäen, että työsuunnitelmat ja varustelumateriaalit ovat saatavilla.

Lohkovarustelua jatketaan aina siihen asti, kunnes viimeinen lohko on nostettu rungolle. Lohkon noustessa rungolle lohkovarusteluvaihe vaihtuu aluevarusteluvaiheeksi.

Kuvasta 6 havaitaan, että varustelutyö on erittäin merkittävässä asemassa projektin aikataulun onnistumisen kannalta. Lohkovarustelutyö alkaa viikolla 38 ja viimeinen varustelutyön tehtävä valmistuu aikataulun perusteella viikolla 103. Varustelutyön kokonaiskesto esimerkiksi laivaprojektissa on 65 viikkoa. Perus- ja valmistussuunnittelua tehdään varustelutyön kanssa rinnakkain. Myöhästymiset suunnittelutyössä heijastuvat negatiivisesti varustelutyön etenemiseen. Perussuunnitteluvaiheessa (PES-vaihe) määritetään laivan rakennustapa, alue- ja lohkojako sekä aikataulut. Myös laivan yleisjärjestely, järjestelmien, tilojen ja rungon suunnittelu hyväksytetään tilaajalla, viranomaisilla ja luokituslaitoksella (Kosola, 1997). Tämän lisäksi tehdään valmistussuunnittelun edellyttämät resurssivaraukset. Valmistussuunnitteluvaiheessa (VAS-vaihe) suunnitellaan laivan työsuunnitelmat ja osaluettelot sekä tarvittaessa päivitetään perussuunnitteluaineistoa (Kosola, 1997). Edellä kuvatun tarkastelun pohjalta voidaan todeta, että moduuli- ja lohkovarustelun toteuttaminen ovat ydinasioita varustelutyön tehokkuuden kannalta KPT-konseptissa.



Kuva 6 Laivaprojektin aikataulu hankintapäätöksestä luovutukseen (Nousiainen, 2014)

2.5.1 Moduulivarustelu osana lohkovarustelua

Moduulivarustelu ei ole uusi konsepti valmistus-, rakennus-, auto- ja meriteollisuudessa (Baade, et al., 1998). Modulaarista varustelua meriteollisuudessa kuvataan monella eri tapaa kirjallisuudessa. Wei kuvaa modulaarista varustelua seuraavasti: ”modulaarinen

varustelu laivanrakennuksessa on laitteiden ja muiden varustelukomponenttien asennusta työpajalla” (Wei, 2012). Österholm & Tuokko (2001, s. 8) puolestaan kuvaavat moduolointia seuraavasti: ”Moduloinnilla tarkoitetaan tuotteen jakamista itsenäisiin yksiköihin (moduuleihin), joilla on tarkasti määritellyt ja vakioina pidetyt rajapinnat, jotka mahdollistavat moduulien yhdistettävyyden ja vaihdettavuuden.” Hölttä-Otto (2005) kuvaa moduulin olevan itsenäinen rakennusosa suuremmasta systeemistä, jolla on hyvin määritellyt rajapinnat ja tietty funktio.

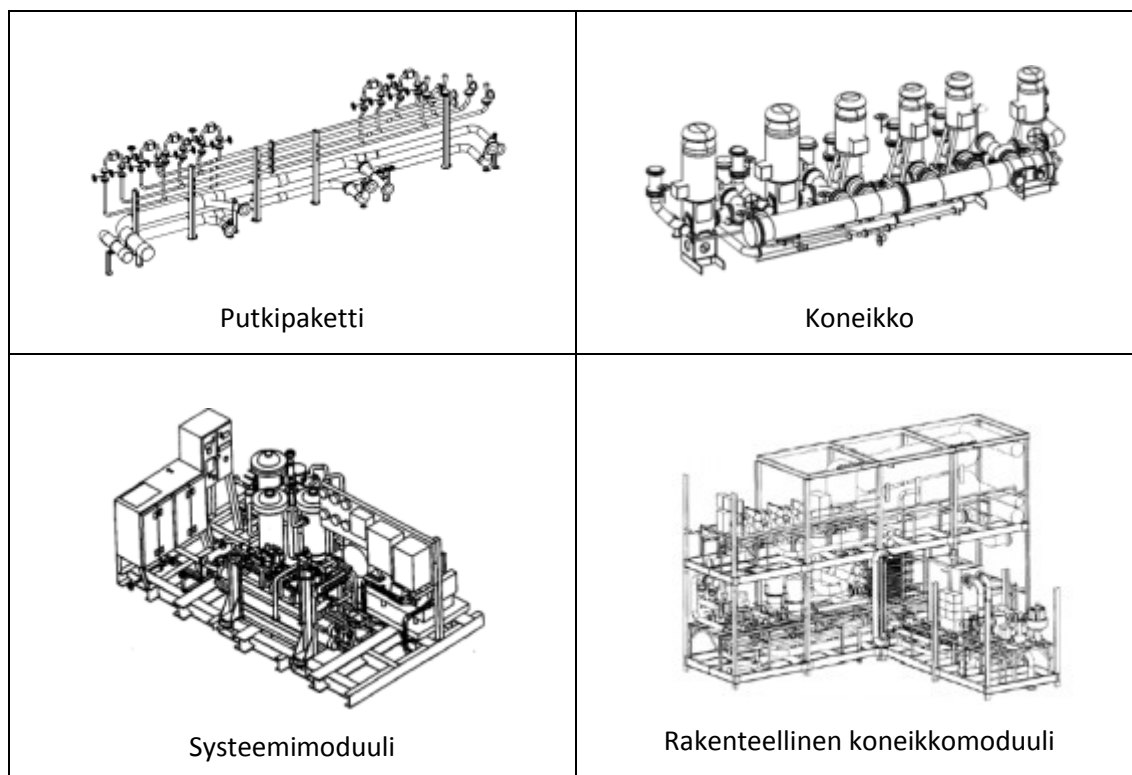
Moduulit voidaan jakaa kolmeen eri ryhmään: suunnittelu-, valmistus- ja asiakasmoduulit (Mattson & Maglepy, 2001; Sako & Murray, 2000). Tässä työssä moduolointia käsitellään erityisesti valmistuksen kannalta, lohkovarustelun työkaluna. Moduloinnin avulla voidaan suuri määrä komponentteja esikasata moduuleiksi ja asentaa paikalleen suorittamalla pieni ja yksinkertainen sarja tehtäviä (Sako & Murray, 2000). Moduloinnin hyödyiksi voidaan lukea rakennusalueen ja ajan erottaminen laivan varustelu- ja laivanrakennustoiminnan välillä (Baade, et al., 1998; Altic, et al., 2003).

On erittäin tärkeää, että jo suunnittelun alkumetreillä päätetään mitä laivan alueita tulee moduloida (Baade, et al., 1998). Modulaarinen varustelu perustuu esivarusteluun työpajoilla. Se alkaa jo suunnittelun aikaisessa vaiheessa erityisesti konealueiden yleisjärjestelyä suunniteltaessa (Rubesa, et al., 2011). Tässä vaiheessa toiminnallisesti kytköksissä olevien laitteiden ja tankkien sijainnit määritetään moduuleiden käytön maksimoimiseksi ja varatun tilan minimoimiseksi (Wei, 2012). Lopullinen moduulien määrä ja sijainti vahvistetaan läpikäymällä joukko tutkimuksia, rakennustapoja, ja alustavia järjestelmäreitityksiä. Tästä syystä moduulit on optimoitu perustuen insinööritoimintaan, taloudellisiin parametreihin sekä tilan käyttöön. (Altic, et al., 2003; Rubesa, et al., 2011)

Modulaarinen varustelukonsepti vaatii muutoksia laivanrakennuksen suunnitteluun ja teknologisiin prosesseihin. Suunnittelutyö ja dokumentaation valmistelu vaativat parempaa insinööritaitoa, laadunvarmistusta sekä suunnittelun parempaa standardointia rajapintojen minimoimiseksi. (Fan, et al., 2007)

Moduulit voivat olla pieniä laitteita asennettuna yleisille tukirakenteille ja valmiina asennettavaksi tasolohkoon, lohkoon, runkolohkoon tai laivaan aluevarusteluvaiheessa.

Tällöin moduuleita kutsutaan yleisesti koneikoiksi. Toisaalta moduulit voivat olla monimutkaisia, useasta laitteesta, putkesta ja muusta systeemistä koostuvia kokonaisuuksia. (Fan, et al., 2007) Yleisimmät moduulityypit on esitetty kuvassa 7. Näitä ovat useasta putkesta ja niiden kannakkeista koostuva putkipaketti, koneikko, systeemimoduuli ja rakenteellinen koneikkomoduli. Koneikko koostuu yhdestä tai useammasta varustesysteemistä sisältäen kaikki mekaaniset ja elektroniset komponentit. Tämä varustesysteemikokonaisuus on asennettu valmiiksi alustalle. Systeemimoduuli on koneikkoa suurempi kokonaisuus. Rakenteellisella koneikkomodulilla tarkoitetaan rakennetta, joka koostuu yhdestä tai useammasta systeemimoduulista, niiden tukirakenteesta ja kaikista tarkasteltavan alueen varusteista (Rubesa, et al., 2011).



Kuva 7 Yleisimmät käytössä olevat moduuliyksiköt (Rubesa, et al., 2011)

Modulaarisen lähestymistavan yksi suurimpia hyötyjä on moduulien valmistamisen ja kokoamisen mahdollisuus telakan tuotantotilojen ulkopuolella, joustavammilla alihankkijoilla (Gagali, et al., 2009). Pienemmät toimijat ovat tuotannollisesti tehokkaampia verrattuna perinteiseen telakkaan, jolla on yleensä ongelmia säilyttää korkean tuottavuuden taso. Keskittymällä vain tiettyjen varustelukomponenttien valmistukseen on pienemmillä toimijoilla mahdollisuus keskittyä juuri kyseisten varusteiden tuotannon tehokkuuden parantamiseen. Modulaarista varustelua kasvattamalla saadaan tuotantoa virtautettua vähentämällä työntekijöiden

yhteentörmäyksiä. Pitkällä aikavälillä standardoitujen ja yhtenäisten moduulien käyttö voi johtaa suunnittelun kustannusten laskuun, koska standardisoimalla systeemejä suunnitteluun kuluva aika vähenee. (Rubesa, et al., 2011)

Koneikkojen ja moduulien valmistuttua ne toimitetaan telakalle juuri oikeaan tarpeeseen (JOT). Suuret varustelukokonaisuudet saadaan nostettua suurina yksikköinä lohkokon, mikä vähentää telakan lohkovarusteluun kuluva työtunteja ja tehostaa tuotantoa.

2.5.2 Konehuoneen lohkovarustelun periaatteet

Konehuoneen varustelu on pyrittävä aloittamaan mahdollisimman aikaisin johtuen konealueiden aikataulukriittisyydestä. Tutkimuksessa käsiteltyjen arktisten työalusten läpimenoaika perustuu pitkälti konehuoneen varustelun nopeuteen. Kirjallisuudessa esiintyy useita suosituksia konealueiden lohkovarusteluasteen nostamisesta vähintään 80 prosenttiin (Baade, et al., 1998; Schank, et al., 2005).

Saksan Emdenissä sijaitseva Thyssen Nordseewerke on kehittänyt patentoidun konseptin laivan konehuoneiden modulaariseen rakentamiseen. Konsepti mahdollistaa laivan konehuoneen teräsrakenteen ja konehuoneen varustelumuodulin toisistaan irrallisen valmistamisen. Kuitenkin tutkimuksen yhteydessä havaittiin lukuisia ongelmia. Kaksi suurinta tutkimuksessa mainittua ongelmaa johtuivat kustannusten kasvusta. Suunnittelun kustannukset kasvoivat johtuen tuotannon vaatimista yksityiskohtaisimmista suunnitelmista. Myös vaatimus tuotantotilojen uusimisesta ja kuljetuskoneiden kapasiteetin kasvattaminen nostivat kustannuksia. (Baade, et al., 1998)

Konehuoneen modulaarisuuden tutkimuksessa (Baade, et al., 1998) määritettiin laitteet, joiden moduointimahdollisuudet ovat suurimmat ottaen huomioon niiden sijainnin ja ympäröivät järjestelmät. Moduuleiden koko standardisoitiin, jotta niiden toimitus rekalla telakka-alueelle olisi mahdollista. Moduulit koottiin yhteen työpajalla, minkä jälkeen ne esivarusteltiin ja testattiin. Tutkimuksen seurauksena päädyttiin seuraaviin itsenäisiin moduuliyksiköihin:

- konevalvomo
- Pääkoneiden makeanveden jäähdytysjärjestelmät

- Merivesijärjestelmät mukaan lukien pääkoneiden merivesijäähdytys, palontorjunta, pilssivesi- ja painolastinpumppausjärjestelmät
- Generaattorit
- Ilmanvaihto
- Harmaavesijärjestelmä
- Kaapeliradat
- Juomavesisysteemi
- Polttoaineseparaattorit mukaan lukien lämmönvaihtimet, pumput ja jäteöljytankit
- Startti-, käyttö- ja työilma
- Voiteluöljyjärjestelmä

Konealueilla lohkojako on merkittävä tekijä varustelun tehostamiseksi. Konehuoneen lohko pyritään pitämään mahdollisimman pitkään päältä auki, jotta laitteita ja koneikkoja saadaan nosturin avustuksella kyytiin. Konehuoneen kattolohko puolestaan pyritään varustelemaan jalkoasennossa mahdollisimman pitkälle lohkovarustelun tehokkuuden ja työturvallisuuden varmistamiseksi.

2.6 Korkeamman lohkovarusteluasteen rajoitukset

Lohkovarusteluasteen nostamiseen liittyy rajoittavia tekijöitä. Näiden tekijöiden ennalta ehkäisy on äärimmäisen tärkeässä roolissa, kun pyritään nostamaan lohkovarustelun tasoa. Kirjallisuudessa rajoittaviksi tekijöiksi mainitaan (Schank, et al., 2005; Wei & Nienhuis, 2010);

- Suunnittelun myöhästyminen
- Varustelumateriaalin ja laitteiden puutteellisuus
- Laitteiden rikkoutuminen
- Kokemuksen puute korkeamman varusteluasteen saavuttamisesta
- Lohkotehtaan rajoitukset
- Lohkovarustelun aikarajoitukset

Lohkovarustelun onnistumisen kannalta valmistussuunnittelun valmius on avaintekijä (Tamminen, 1997). Tämä vaikuttaa työnsuunnitteluun ja lohkovarustelun hallintaprosessiin. Valmistussuunnitelmien myöhästyessä myös materiaalitoimitukset viivästyvät.

Myöhästymää aiheuttaa lisäksi viivästyneet sopimusneuvottelut. (Schank, et al., 2005; Wei & Nienhuis, 2010) Hajanainen varustelusuunnitelma aiheuttaa yhteentörmäyksiä. Tämä johtaa työn uudelleensuunnitteluun ja pitkiin odotusaikoihin, jotka vähentävät varusteluajan tehokasta käyttöä. (Wei & Nienhuis, 2010)

Lohkovarustelun aikarajoitukset tarkoittavat tässä kontekstissa rungonkoonti- ja lohkovarustelu-aikataulun välistä integrointia. Rungonkoonnin ollessa pullonkaula laivanrakennusprojektissa menee siis usein lohkovarustelu-aikataulun edelle. (Wei & Nienhuis, 2010) Tämä tarkoittaa, että vaikka varustelutyö olisi vielä kesken, niin lohko nostetaan rakennusaltaaseen rungonkoonnin aikataulun mukaisesti. Rungonkoonnin myöhästyessä ei lohkovarustelun tekemiselle jää tarpeeksi aikaa.

Laitteiden rikkoutuminen on aina riskinä, kun ne asennetaan laivaan aikaisessa vaiheessa. EMS varustelun jälkeen lohko lähtee raepuhallukseen ja maalaukseen, minkä aikana suojaamattomat varusteet voivat rikkoontua. Huolellisella laitteiden suojauksella tämä rajoittava tekijä saadaan eliminoidua.

Lohkotehtaan nostokapasiteettia ei saa ylittää lohkoja varusteltaessa. Tämä tarkoittaa, että joissain tapauksissa lohkotehtaan nostokapasiteettirajoitukset estävät varusteiden asennuksen lohkoon. Lohkotoimittajan toimittamissa osa- ja runkolohkoissa myös tuotantokapasiteetin ylittyminen rajoittaa lohkovarustelun tasoa.

3 Simulointi ja mallinnus

Kokoonpanotelakan varusteluprosessin tarkastelua varten työssä tarvitaan luotettava laskentamenetelmä kyseisen prosessin mallintamiseksi. Tästä syystä kappaleessa luodaan yleiskatsaus simuloinnin ja mallinnuksen teoriaan sekä mallinluontiprosessiin. Tämän jälkeen kuvaillaan laivanrakennuksessa tehtyjä simulointeja sekä syvennyttään lohkotuotannon simulointimethodeihin. Lopuksi kappaleessa käydään läpi eri kirjallisuudessa esiintyviä lohkovarustelun hyvyyden mittareita tutkimuksessa käytettävän mallin pohjaksi.

3.1 Yleistä

Mallintamisella tarkoitetaan prosessin tai järjestelmän jäljittelemistä esimerkiksi matemaattisin keinoin. Virheettömän mallin luominen tuottaa haasteita johtuen mallinnettavien prosessien monimutkaisuudesta. Tästä syystä mallin luoja on tehtävä eräitä yksinkertaistuksia eikä kaikkia laskentaan vaikuttavia tekijöitä kannata ottaa huomioon. (Niemi, 2006) Nykyisin puhutaan digitaalisesta mallintamisesta, koska suurin osa prosessisimulointimalleista tehdään tietokoneavusteisesti. Pyrkimyksenä on mallintaa ja simuloida yhä suurempia kokonaisuuksia kuten valmistusprosessia ja suunnittelua. (Kim, et al., 2005)

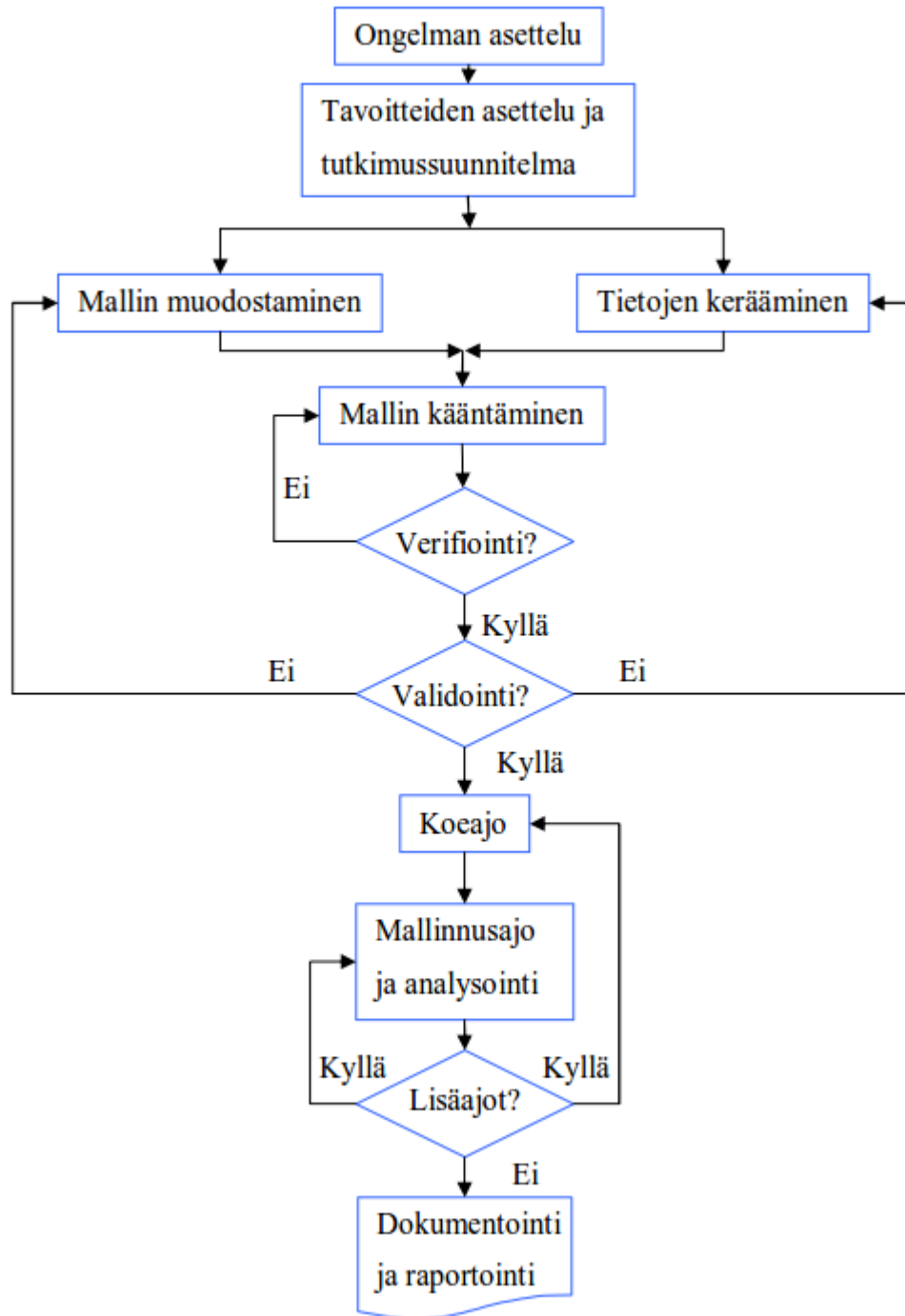
Simulointi koostuu useasta eri vaiheesta. Prosessi jaetaan aliprosesseiksi ja tehtäviksi, joiden avulla voidaan määrittää prosessin osatekijöiden osuus kokonaisuudesta. Mallilla tutkitaan laskentatuloksien muutosta modifioimalla lähtöarvoja. (Hokkanen, et al., 2011)

Klassisen simulointimallin ensimmäinen vaihe on tutkimusongelman määrittely. Tutkimusongelman selkeän asettelun jälkeen on vuorossa projektisuunnitelman kehittäminen ja projektin tavoitteiden asettelu. Tässä työvaiheessa tehdään yleisesti päätös simulointityökalun käytöstä. Tavoitteiden selkeän esityksen apuvälineenä on syytä käyttää kuvia, yksinkertaisia esimerkkejä ja kaavioita syötteen ja tulosten kuvaamiseksi. Näin toimimalla voidaan varmistaa kaikkien projektiin osallistuvien täysi ymmärrys projektin tavoitteista. (Lilley, et al., 2001) Simulointimallin klassinen muodostamiskaavio on esitetty kuvassa 8.

Seuraava vaihe on mallin muodostaminen ja tiedon keruu. Mallin kehittäminen ja tiedonkeruu ovat aina yhteydessä toisiinsa ja tästä syystä ne tulee tehdä rinnakkain. Mallin luominen ilman lähtöarvoihin perehtymistä voi johtaa tilanteeseen, missä lähtöarvojen selvittämisestä tulee vaikeaa tai mahdotonta tiedon puutteen vuoksi. Tutkittavan ongelman rajojen asettaminen on kriittinen vaihe prosessin onnistumisen kannalta. Tämä on yleensä iteratiivinen prosessi, jossa aihepiirin asiantuntijoiden apua tulee käyttää hyväksi. Käytettävän tiedon saatavuus on avaintekijä resurssitarpeen hahmottamiseksi ja projektin aikataulun määrittämiseksi. (Lilley, et al., 2001)

Varsinaisen mallin luonti alkaa, kun yllä kuvatut vaiheet on tehty. Tässä työvaiheessa kirjoitetaan varsinainen ohjelma edellisten vaiheiden avulla luotujen algoritmien perusteella. Kun on todettu, että mallinnus on algoritmien mukainen, voidaan malli verifioida. Validointi aloitetaan mallin vastatessa todellista prosessia. (Lilley, et al., 2001)

Mallinnuksen onnistumiseen ja tulosten luotettavuuteen vaikuttavat useat muuttujat. Mallin luoja on ymmärrettävä mallinnettava prosessi ja siinä esiintyvät sisäiset riippuvuudet mallinnuksen aloittamisen mahdollistamiseksi. Mallissa esiintyvien matemaattisten kuvauksien on vastattava todellisuutta, jotta mallin tulokset ovat luotettavia. Mallin käyttökelpoisuuden varmistamiseksi mallinnusprosessin on oltava johdonmukaisesti kehitetty ja mallia on syytä koekäyttää kehityksen aikana. (Lilley, et al., 2001)



Kuva 8 Mallintamisen kaavio (Banks, 2005)

3.2 Simulointi laivanrakennusteollisuudessa

Simuloinnilla on tärkeä rooli tuotantoyritysten prosessien kehittämistyökaluna. Kilpailussa ympäristössä muutokset tuotantojärjestelmissä vaikuttavat suuresti yrityksen suorituskykyyn ja tuottavuuteen. Simulointia on käytetty laajalti usealla eri teollisuuden alalla, koska se luo suurta etua tuotannonsuunnittelijoille. Simuloinnin on huomattu olevan erittäin hyödyllinen työkalu tukemaan telakan tuotantoalueen- ja tuotannonsuun-

nittelua sekä tuotantoprosessien mallintamisessa. (Ozkok & Helvacioğlu, 2013) Simuloinnin avulla pystytään tutkimaan erilaisia toimintatapoja ja menetelmiä prosessia häiritsemättä. Laivanrakennusteollisuudessa tuotannon simulointityökaluja on käytetty erityisesti pullonkaulojen tunnistamiseksi.

Laivanrakennusprosessi on yleisesti kuvattu ainutkertaisena tuotantoprosessina. Tuotantoprosessit ovat toistuvia, mutta prosessin sisäiset tekijät ja niiden riippuvuudet vaihtelevat. Jokaisella uudella laivaprojektilla eri rajoitukset määrittävät rakennustavan, mikä johtaa uudelleen toimintojen sarjaan. Kompleksisten ainutkertaisen tuotantoprosessien kentässä on hyvin vaikeaa siirtää simulointimallia projektista toiseen. Tästä syystä on tärkeää, että mallin luomisprosessi on nopea ja joustava. Laivaprojektille on myös ominaista se, että tuotannon alkaessa suunnittelutyö ei ole kaikilta osin valmis. (Steinhauer & Soyka, 2012)

Flensburger Schiffbau- Gesellschaft telakka (FSG) on kehittänyt vuodesta 1997 lähtien simulointimallia ainutkertaisen tuotantoprosessin vaatimuksille. Sarjatuotannon käyttämiin simulointimalleihin verrattuna täytyy simulointimallin olla käytettävyydeltään joustavampi. Kehitettyä mallia on käytetty telakan layoutin suunnittelussa ja tuotannon suunnittelun apuvälineenä. Dynaamisella ja yksityiskohtaisella mallilla on saatu parannettua suunnittelun uskottavuutta ja telakan tuottavuutta. (Steinhauer & Soyka, 2012)

3.2.1 Lohkotuotannon simulointimetodit

Lohkovarustelun tehokkuutta simulointityökaluja hyväksikäyttäen on tutkittu verrattain vähän. Yksi syy tähän on varustelutoteutuksen kompleksisuus. Luotettavan varustelun simulointimallin aikaansaamiseksi täytyy ottaa huomioon teknologisten riippuvuuksien rajoitukset sekä turvallisuuskriteerit. (König, et al., 2007)

Eräissä tutkimuksissa pyrittiin kehittämään prosessi mittaamaan modulaarisen varustelumallin kustannuksia verrattuna tämänhetkisen toimintatavan tuottamiin kustannuksiin. Tutkimuksen työkaluina käytettiin asiantuntijoiden empiiristä tietotaitoa, tiedonkeruun metodia ja olemassaolevaa statistiikkaa. Tutkimuksessa aluevarusteluvaiheen työmäärää pyrittiin vähentämään kasvattamalla esikasattujen koneikkojen ja lohkovarustelun määrää. Tutkimuksessa havaittiin, että laivan konehuoneessa on suurin potentiaali kasvattaa moduloitua varustelua sekä saavuttaa suurimmat kustannussäästöt. Tutkimuksessa käytetty menetelmä on kuvattu liitteessä 1. (Rubesa, et al., 2011) Edellä

kuvatun menetelmän soveltaminen tässä tutkimuksessa osoittautui haastavaksi yksityiskohtaisen varustelutiedon puutteellisuuden johdosta.

Ozkok & Helvacioğlu (2013) pyrkivät simulointia hyväksikäyttäen tutkimaan putki- ja varusteluasennusten aikaistamisella tapahtuvaa muutosta lohkovalmistuksen suoritustehon kasvussa. Ozkok käytti tutkimuksessaan hyväksi ARENA simulointiohjelmaa ja tuloksena tutkittavan telakan pullonkaulana pidetyn lohkovalmistuksen suoritusteho kasvoi 33 % ilman investointitarpeita.

Kumar & Aoyama (2009) käyttivät tutkimuksessaan hyväksi sumeaa logiikkaa tutkiakseen laivaprojektin optimaalista lohkojakoa. Lohkojaon optimoimiseksi otettiin huomioon rungon rakenteelliset tekijät, varustelu ja valmistus. Lohkojaon tutkiminen sumean logiikan avulla osoittautui tutkimuksen aikana epätarkaksi, koska useita tekijöitä jouduttiin oletamaan heikoin perustein. Sumean logiikan avulla tarkkojen tulosten saaminen vaatii hyvää integraatiota tutkimuksessa käytetyn mallin ja telakan järjestelmien välillä.

Laivanrakennusteollisuudessa etsitään jatkuvasti uusia varustelukonsepteja – erityisesti parantamaan lohkovarusteluastetta. Fafandjel (Fafandjel, et al., 2008) loi tutkimuksessaan mallin mittaamaan prosessioptimoinnin tuloksia käytettäessä modulaarista varustelukonseptia. Työssä mitattiin varusteluprosessin kehittymistä kun aluevarustelua siirretään tehtäväksi työpajoille ja lohkovarusteluvaiheeseen sekä käytetään hyväksi koneikovarustelukonseptia. Tutkimuksen tuloksena laivanvarustelun läpimenoaikaa saatiin lyhennettyä 31 % ja kustannuksia laskettua 15 % kasvattamalla varustelun modulaarisuutta ja lohkovarusteluastetta. Fafandjelin luoma varustelukeston tutkimismalli on esitetty liitteessä 2.

STX Finland Oy:n teettämässä laivan rakentamistavan kehitysprojektissa saavutettiin jopa 35 % kasvu varustelun tuottavuudessa ja lohkovarusteluaste nousi 40 %. Tulos aikaansaatiin lisäämällä modulaarista rakennustapaa ja parantamalla työskentelyolosuhteita. Lohkovarusteluasteen noston seurauksena aluevarusteluvaiheessa tehtävä kuumavarustelutyö väheni 80 %. (Huttunen, 2014)

Wei & Nienhuis (2010) esittelee tutkimuksessaan automaattisen varustelun aikataulutusmallin, jonka avulla pyritään parantamaan lohkovarusteluastetta kontrolloidun työsuunnittelun avulla. Tutkimuksessa esitetään lohkovarustelun fundamentaaliseksi ongelmaksi tunnistaa taloudellisesti ja teknisesti toteutettavat mahdollisuudet; onko tarpeeksi aikaa ja resursseja varustella lohkoa ja onko se teknisesti toteutettavissa? Mallin hyödyiksi mainitaan kiinteän suunnittelun ja lohkovarustelun kontrolloinnin parantuminen.

Laivanrakennuksen varusteluprosesseja on myös pystytty mallintamaan vakiointiin perustuvan simulointimallin avulla ja tutkitaan mitä toimenpiteitä laivan varustelusuunnittelun parantamiseksi voidaan tehdä. Tutkimuksen tuloksena luotiin malli varustelusuunnittelun avuksi käyttäen hyväksi SIMoFIT (Simulation of Outfitting Processes in Shipbuilding and Civil Engineering) ohjelman diskreettiä mallinnuskehystä. Tämän avulla voidaan kehittää varustelun aikatauluja ottaen huomioon työvaiheeseen vaikuttavia eri tekijöitä jakamalla varustelulle ominaiset tekijät koviin ja pehmeisiin rajoitteisiin. Tällä metodilla luotu mallinnusprosessi on erittäin joustava. (König, et al., 2007)

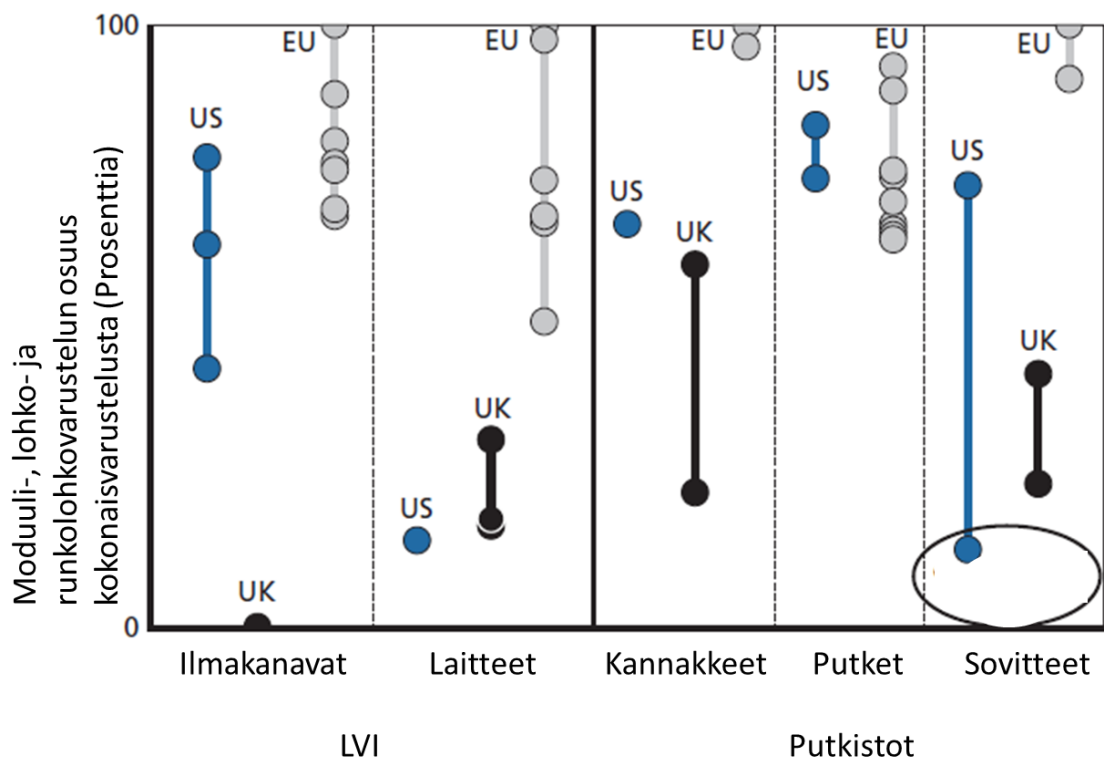
Telakka 2000 hankkeen yhteydessä pyrittiin kehittämään laskentamalli laivan eri rakentamistapojen kustannusten mallintamiseksi (Nallikari, et al., 1995). Tutkimuksen tueksi päädyttiin luomaan taulukkopohjainen laskentamalli. Kyseisen tutkimuksen johtopäätelmissä tultiin siihen tulokseen, että lohkovarusteluasteen nostaminen on tehokas tapa vähentää laivan valmistuskustannuksia. Telakka 2000 hankkeen yhteydessä tehtiin toinenkin tutkimus koskien tuottavuutta valmistusprosessien eri vaiheissa (Nallikari, et al., 1994). Tutkimuksessa pyrittiin mallintamaan laivan rakennustapojen kokonaistaloudellista vaikutusta ja yhtenä osatekijänä tutkimuksessa mainittiin lohkovarusteluasteen nostamisella saavutettavat aika- ja työtuntisäästöt.

3.2.2 Lohkovarustelun mittarit

Kirjallisuudessa lohkovarustelun hyvyyden mittariksi on usein esitetty lohkovarusteluaste (Schank, et al., 2005). Tällä tarkoitetaan lohkovaiheessa asennetun varustelun prosentuaalista osuutta koko laivan varustelusta. Toinen tapa kuvata lohkovarustelun hyvyttä on työn tuottavuuden kautta (Huttunen, 2014). Esimerkiksi nostamalla varustelun modulaarisuutta ja tekemällä lohkovarustelua paremmassa työskentelyasennossa voidaan työn tuottavuudessa saavuttaa suuria harppauksia kuten

taulukko 1 osoittaa. Vaihtoehtoinen tapa kasvattaa lohkovarustelun työn tehokkuutta on lisätä moduulivarustelun määrää (Rubesa, et al., 2011). Kolmas kirjallisuudessa esiintyvä mittari lohkovarustelun onnistumiselle on varusteltavan lohkon läpimenoaika (Ozkok & Helvacioğlu, 2013). Eräissä tutkimuksissa lohkovarustelun hyvyyden mittarina käytettiin lohko- ja moduulivarusteluun käytettyjen tuntien suhdetta kokonaisvarustelun tunteihin. Tämän avulla tutkimuksessa osoitettiin kuinka alkupään varustelun tunteja kasvattamalla koko uudisrakennusprojektiin käytettävät varustelutunnit laskevat. Tutkimuksessa käytettiin hyväksi eri työaikakertoimia varustelutyölle riippuen työn suorittamisvaiheesta. (Fafandjel, et al., 2008)

Iso-Britannian puolustusministeriön teettämässä tutkimuksessa (Schank, et al., 2005) pyrittiin selvittämään Yhdysvaltojen ja Euroopan eri telakoiden lohkovarusteluasteita systeemikohtaisesti. Tutkimuksessa ilmeni hyvin suurta vaihtelua eri telakoiden välillä koskien varustelutyön suoritusajankohtaa. Kuvassa 9 esitetään putkien ja LVI-komponenttien asennusprosentti lohkovaiheessa eri telakoilla. Kuvaajan y-akseli kuvaa asennetun varustelun määrää lohkovaiheessa ja x-akselilla on esitetty mikä varustelukokonaisuus on kyseessä.



Kuva 9 Putkien ja LVI – komponenttien lohkovarusteluaste Euroopan ja USA:n telakoilla (Schank, et al., 2005).

Yllä olevasta kuvasta huomataan, että osa telakoista pystyy asentamaan lähes kaikki LVI-komponentit jo lohkovaiheessa paikalleen. Toisaalta osa telakoista jää noin kahdenkymmenen prosentin lohkovarusteluasteeseen putkien ja LVI komponenttien osalta. Hajonta telakoiden välillä on suurta ja se voi johtua monesta eri tekijästä. Esitetyn tutkimuksen tuloksia voidaan pitää hieman kyseenalaisina, koska eri telakoilla varusteluun liittyvä termistö ymmärretään eri tavoin (Rubesa, et al., 2011). Tästä syystä telakoilla on eri käsitykset esimerkiksi lohkovarustelun tai koneikkovarustelun merkityksestä. Tutkimus ei myöskään ota kantaa kyselyyn vastanneiden telakoiden valmistamiin alustyyppeihin.

4 Menetelmä lohkovarustelun hyvyyden mittaamiseksi

Tässä kappaleessa esitetään malli ja sen luomisprosessi lohkovarustelun hyvyyden mittaamiseksi. Laskentamalli pohjautuu Fafandjelin (Fafandjel, et al., 2008) kehittämään malliin, mutta sitä on jatkokehitetty kokoonpanotelakkakonseptiin sopivaksi. Kappale on jaettu kolmeen osaan; ensimmäinen vaihe on lohkovarustelun hyvyyden mittarin määrittäminen. Tämän jälkeen esitellään kirjallisuuden perusteella valitut työaikakertoimet, joita käytetään laskentamallin pohjana. Toisessa vaiheessa esitellään tutkimuksessa käytettävä varusteluprosessin laskentamalli sekä mallissa käytettävät lähtö- ja tulosmuuttajat. Lopuksi esitellään vielä laskentamallin luomisprosessi sekä mallin epävarmuustekijöiden huomiointi.

4.1 Lohkovarustelun hyvyyden mittari

Tässä tutkimuksessa lohkovarustelun hyvyyden mittariksi on valittu Fafandjelin tutkimuksessaan (Fafandjel, et al., 2008) käyttämä lohkovarusteluun käytettävä aika suhteessa kokonaisvarustelutunteihin laivanrakennusprojektin aikana. Tähän vaihtoehtoon päädyttiin, koska luotettavien lähtöarvojen avulla näille tutkimustuloksille saadaan luotua uskattavuutta. Telakan edellisissä laivaprojekteissa käyttämät työtunnit lohkovaiheen varustelussa, aluevaiheessa ja varustelun kokonaistunnit ovat myös helposti saatavilla (Havas, 2014; Tuokkola, 2014). Lähtötietojen saatavuudella oli suurta painoarvoa valittaessa tutkimuksessa käytettävää lohkovarustelun hyvyyden mittaria.

4.2 Menetelmän kuvaus

Laivan varusteluprosessin laskentamalli perustuu eri varustelutoimintoihin käytettävän ajan tarkasteluun. Varustelutyöhön käytetty aika saadaan johdettua käyttämällä työaika-kertoimia ja telakan tilastollisia arvoja eri työvaiheiden kestosta. Varustelutoimintojen kesto ilmaistuna työtunteina soveltuu tuotantoprosessien tehokkuuden mittaamiseen. Tämä on myös sopiva lähestymistapa varustelun kustannusten ja keston mallintamiseksi, kun työtunnit on kerrottu työn tuntikustannuksella tai jaettu työntekijöiden määrällä (Tsai & Chang, 2004). Varustelutoimintoihin kuluvan ajan tarkastelu on myös hyödyllinen työkalu laivaprojektin varhaisessa vaiheessa tehtävään työnsuunnitteluun ja kustannusten laskentaan (Roy, et al., 2008).

Varusteluprosessia kuvaavan laskentamallin avulla mallinnetaan modulaarisen- ja lohkovarustelun työtuntien kasvattamisen vaikutusta varustelun kokonaistunteihin ja läpimenoaikaan. Varustelutyön kestoa eri varusteluvaiheissa mallinnetaan taulukossa 1 esitettyjen työaikakertoimien pohjalta. Lohko- ja moduulivarustelun määrän kasvaessa aluevarustelun tunnit vähenevät suhteessa moninkertaisesti (Fafandjel, et al., 2008).

4.2.1 Varustelutyön työaikakertoimien määrittäminen

Uuden konseptin mukaisen varustelutyön läpimenoajan mallintamiseksi käytetään avuksi Fafandjelin tutkimuksessaan johtamaa laskentamallia (Fafandjel, et al., 2008). Malli perustuu työaikakertoimien avulla muodostettuun laskentamalliin. Kyseisessä mallissa x-määrä aluevarustelutyötunteja siirretään lohkovarusteluun, tasolohkovarusteluun ja työpajoilla tehtävään moduulivarusteluun, mikä vähentää aluevarustelutunteja suhteessa enemmän kuin kasvattaa lohko-, tasolohko- ja moduulivarustelutunteja. Suhdeluvut moduuli-, lohko- ja aluevarustelun välillä on kuvattu taulukossa 2. Näihin suhdeluihin päädyttiin haastatteluiden ja kirjallisuudesta saatujen työaikakertoimien pohjalta. Koneikko-, moduuli-, tasolohko- ja lohkovarustelusta käytetään tässä työssä yleistä nimitystä alkupään varustelu. Tätä nimitystä myös Fafandjel käytti teettämässään modulaarisen varustelun prosessioptimointi tutkimuksessa (Fafandjel, et al., 2008).

Taulukko 2. Laskentamallissa käytetyt työaikakertoimet

Työvaihe	Muuttuja	Kerroin
koneikkorakentaminen	Y_1	1
moduulirakentaminen	Y_1	1
tasolohkovarustelu	Y_2	1,5
lohkovarustelu	Y_3	2
aluevarustelu rungolla	Y_4	4

Koneikko- ja moduulirakentamisen työaikakertoimeksi valittiin kerroin yksi. Kirjallisuudessa esiintyi hyvin pieniä eroja kyseisten arvojen välillä, joten saman kertoimen valitseminen molemmille toiminnoille voidaan pitää perusteltuna. Tämän avulla myös taulukkoon 3 pohjautuvaa laskentamallia saatiin yksinkertaistettua. Tasolohkovarustelun kertoimeksi määritettiin kirjallisuuden perusteella kerroin 1,5. Varustelun suorittaminen tasolohkovaiheessa vie kokemuksen perusteella enemmän aikaa verrattuna moduulirakentamiseen. Tästä syystä Remeksen esittämä (2013) kerroin 1.5 kuvastaa paremmin todellisuutta, kuin Schankin tutkimuksessaan (Schank, et al., 2005) esittämä kerroin 1.

Lohkovarustelun työaikakertoimeksi valittiin 2 kirjallisuuteen perustuen. Kappaleessa 2.5 esitetyn taulukon 1 mukaisesti kolme neljästä julkaisusta piti lukuarvoa 2 oikeana kuvaamaan lohkovarusteluvaiheessa tehtävään varusteluun kuluva työaika. Aluevarusteluvaiheen työaikakerroin määritettiin samalla periaatteella kuin edellä kuvattu lohkovarustelun kerroin. Tällä menetelmällä saatiin aluevarusteluun sekä moduuli- ja koneikkorakentamiseen kuluvan ajan väliseksi suhdeluvuksi luku 4.

Kuten kappaleessa 2.5 on todettu lohko- ja runkolohkovarustelu määritellään tässä tutkimuksessa samalla työaikakertoimella, vaikka kirjallisuudessa esiintyy erilaisia kertoimia lohko- ja runkolohkovarustelulle. Kuitenkin näiden kahden varustelutoiminnon keskinäinen ero on niin pieni, että tutkimuksen kannalta näiden kahden toiminnon erottaminen ei ole tarpeen.

Kun työaikakertoimet saatiin määritettyä kirjallisuuteen pohjautuen, varmistettiin niiden paikkansapitävyys kokoonpanotelakkakonseptissa suorittamalla asiantuntijahaastatteluita Helsingin telakalla. Helsingin telakan sisällä esiintyi vaihtelua työaikakertoimien oikeellisuuden varmistusprosessissa. Lohkovarustelun ja aluevarustelun väliseksi työaikakertoimeksi ehdotettiin lukuja 1,5 - 2 (Tuokkola, 2014; Willberg, 2007). Moduulivarustelun ja aluevarustelun välisen työaikakertoimen määrittäminen AHS:llä tuotti haasteita. Kyseisen työaikakertoimen arvot vaihtelivat välillä 5 - 10, koska moduulivarustelun luonteella ja asennuskohteella on suuri merkitys työaikakertoimeen. Kuten edellä on todettu, tutkimuksessa päädyttiin käyttämään työaikakerrointa 4 moduuli- ja koneikkovarustelun sekä aluevarustelun välillä. Työaikakerroin on varmuuden vuoksi valittu konservatiivisesti.

Helsingin telakalta löytyvä edellisten laivaprojektien statistiikka koskien varustelun toteutusta ei ollut niin kattavaa, että varustelutoimintojen väliset työaikakertoimet olisi saatu määritettyä sen perusteella.

4.2.2 Laskentamallin luominen

Taulukossa 3 esitetään varustelutoimintojen keston muutoksen vertailuun käytettävä malli. Sarake A kuvaa vanhan konseptin mukaista varustelutoiminnon kestoa ja sarakkeessa B tämä samainen kesto esitetään prosentteina. Sarake C kuvaa muutosta uuden ja vanhan konseptin varustelutoiminnon kestojen välillä työtunteina. Taulukon sarakkees-

sa D esitetään uuden konseptin mukainen ennustettu toiminnon kesto ja sarake E kuvaa uuden ja vanhan varustelutoiminnon keston muutosta prosentteina.

Fafandjelin tutkimuksessaan käyttämään taulukkoon (liite 2, taulukko 11) on tehty muutoksia, jotta se soveltuu paremmin tähän työhön. Viimeistelyvarustelu on jätetty taulukosta pois, koska tarkoitus on tutkia alkupään varustelun muutoksen vaikutusta aluevaiheen varustelutunteihin. Kyseiseen taulukkoon on lisätty tasolohkovarustelu, koska sen työaikakerroin poikkeaa lohkovarustelun työaikakertoimesta, kuten taulukosta 2 nähdään.

Taulukko 3. Uuden konseptin mukaisten varustelutoimintojen toiminnonkeston muutostarkastelu

		A	B	C	D	E
	Toiminnon kuvaus	Tämän hetkinen toiminnon kesto (työtunteja)	Tämän hetkinen toiminnon kesto (%)	Ero toiminnon kestosa (työtunteja)	Uuden konseptin mukainen toiminnon kesto (työtunteja)	Relatiivinen toiminnon keston muutos (%)
1.	Modulaarinen- ja koneikkovarustelu					
2.	Tasolohkovarustelu					
3.	Lohkovarustelu					
4.	Aluevarustelu					

Laskentamallin lähtömuuttujat

Tulosmuuttujien valinnan jälkeen valittiin lähtömuuttujat laskennan suorittamiseksi. Malliin syötetään ensin tämän hetkisen varustelun toiminnan kesto kuten taulukon 3 A sarakkeesta havaitaan. Toiminnon kestot pohjautuvat telakalta kerättyyn tietoon. Tämän jälkeen malliin syötetään uuden konseptin mukaisen alkupään varustelun muutoksen tunteina. Lohkovarustelun sekä koneikko- ja moduulivarustelun välinen suhde määritetään syöttämällä malliin moduulivarustelun osuus alkupään varustelun muutoksesta. Myös tasolohkovarustelun osuus alkupään varustelusta syötetään taulukkoon. Laskentamallin lähtömuuttujat on esitetty taulukossa 4.

Taulukko 4. Laskentamallin lähtömuuttujat

Kuvaus	Muuttuja	Dimensio
Alkupään varustelun muutos	K	h
Moduulivarustelun osuus alkupään varustelusta	X	%
Tasolohkovarustelun osuus alkupään varustelusta	Y	%
Lohkovarustelun osuus alkupään varustelusta	Z	%
Moduuli- ja koneikkovarustelun muutos	C1	h
Tasolohkovarustelun muutos	C2	h
Lohkovarustelun muutos	C3	h

Taulukossa 4 esitetyt arvot C1, C2 ja C3 määritetään muuttujien K, X, Y ja Z avulla seuraavilla kaavoilla:

$$C1 = X * K \quad (1)$$

$$C2 = Y * K \quad (2)$$

$$C3 = Z * K \quad (3)$$

Missä muuttuja X kuvaa moduuli- ja koneikkovarusteluvaiheen osuutta alkupään varustelutyön muutoksesta prosentteina, muuttuja Y taso- ja osalohkovarustelun osuutta alkupään varustelutyön muutoksesta prosentteina, ja muuttuja Z kuvaa lohkovarustelun osuutta alkupään varustelusta. Muuttuja K kuvaa aluevarustelusta alkupään varusteluun siirrettäviä työtunteja. Muuttujien X, Y ja Z välinen rajoitus määritetään alla esitetyllä yhtälöllä:

$$X + Y + Z = 100\% \quad (4)$$

Laskentamallin tulosmuuttujat

Liitteessä 2 kuvattua lohko- ja koneikkovarustelun toiminnonkeston muutostarkastelu menetelmää soveltamalla (yhtälöt 16 - 23) voidaan tutkia moduuli-, koneikko- ja lohkovarustelutuntien kasvattamisen vaikutuksia aluevarustelutunteihin yhdessä ilman erillisiä taulukoita. Näin toimimalla lohkovarustelun ja moduulivarustelun keskenäisen suhteen arvioiminen rajoittuu. Tässä tutkimuksessa kuitenkin oleellisinta on tutkia kokonaisvarustelutuntien vähenemistä kasvattamalla alkupään varustelutunteja, joten näin voidaan toimia. Tässä toimintamallissa käytetään alla esitettyjä yhtälöitä:

$$D1 = A1 + C1 \quad (5)$$

$$D2 = A2 + C2 \quad (6)$$

$$D3 = A3 + C3 \quad (7)$$

$$D4 = A4 - (C1 * (Y_4 / Y_1) + C2 * (Y_4 / Y_2) + C3 * (Y_4 / Y_3)) \quad (8)$$

Yllä esitetty malli laskee uudet moduuli- ja koneikkovarusteluun käytettävät tunnit yhtälöllä (4). Yhtälön (5) avulla määritetään uudet tasolohkovarusteluun käytettävät tunnit. Lohkovarusteluun uudessa konseptissa käytettävät tunnit määritetään yhtälöllä (6). Aluevarustelutuntien muutos alkupään varustelutuntien muutoksen seurauksena määritetään yhtälöllä (7). Tässä yhtälössä esiintyvät muuttujat Y_1 , Y_2 , Y_3 ja Y_4 ovat kappaleessa 4.2.1 esitettyjä työaikakertoimia (taulukko 2).

Muutos aluevarustelun tunneissa määritetään muuttujien $A4$ ja $D4$ avulla seuraavalla yhtälöllä:

$$C4 = D4 - A4 \quad (9)$$

Uuden konseptin vaikutus varustelun kokonaistunteihin määritetään tutkimuksessa seuraavalla yhtälöllä:

$$\text{Varustelun työtunnit} = (A1 + A2 + A3 + A4) - (D1 + D2 + D3 + D4) \quad (10)$$

Kaavoja (1 - 10) käytetään kappaleen 5 case tutkimuksessa laivan varustelun kokonaiskeston mallintamiseksi eri lohkoitoimitus vaihtoehdoille.

4.2.3 Mallin kääntö, verifiointi ja validointi

Kuten kappaleen 3.1 esitetty mallintamisen kaavio osoittaa (kuva 8), mallin kääntäminen on mallin luomista seuraava vaihe. Mallin kääntämisellä tarkoitetaan luotujen kaavojen kääntämistä tietokoneen ymmärtämään muotoon. Tässä työssä käytettävää mallia ei tarvitse varsinaisesti kääntää, koska malli tehtiin suoraan Microsoft Excel-ohjelmaan eli mallissa käytetyt yhtälöt syötettiin suoraan exceliin.

Toiminnan todentaminen eli toisin sanoen verifiointi on mallin käynnön jälkeen seuraava toimenpide (kuva 8). Ohjelmassa voi esiintyä suunnitteluvirheitä tai käännettäessä monimutkainen ja pitkä ohjelma tietokoneen ymmärtämään kieleen, voi siinä esiintyä ohjelmointivirheitä (Banks, 2005). Tässä vaiheessa siis tarkastettiin, että ohjelma toimii halutulla tavalla suorittamalla ohjelmalla koeajolaskelmia.

Validoinnilla pyritään muokkaamaan laskentamalli vastaamaan todellista prosessia (Banks, 2005). Mallintamisessa joudutaan yleensä tekemään yksinkertaistuksia. Tämän seurauksena täysin oikeiden lopputulosten saavuttaminen on epävarmaa. Mallin koekäytössä onkin tärkeää miettiä, mikä on tarvittava tarkkuus. Tässä tutkimuksessa validointi suoritettiin tarkastelemalla mallin lähtömuuttujia ja työaikakertoimia herkkysanalyysillä, joka on kuvattu tarkemmin seuravaassa kappaleessa.

Mallin epävarmuustekijöiden huomiointi

Luotuun moduuli- ja lohkovarustelun laskentamalliin liittyy mallin luonteesta ja siinä käytettävistä työaikakertoimista johtuen epävarmuustekijöitä. Näiden tekijöiden tunnistaminen ja määrittäminen on mallin uskottavuuden ja tulevaisuuden käytön kannalta tärkeää. Yleisin käytössä oleva epävarmuuden analysointikeino on herkkyysanalyysin teko (Nellimo & Uusi-Rauva, 2005).

Herkkyysanalyysin avulla voidaan tutkia, miten saadut tulokset käyttäytyvät, jos yhden tai useamman mallissa käytetyn syötteen parametri poikkeaa suunnitellusta arvosta. Lisäksi menetelmän avulla saadaan selvitettyä eri parametrien muutoksen vaikutus mallin kokonaistulokseen. Kun kaikille mallin muuttuville parametreille on tehty herkkyysanalyysi, pystytään tutkimuksessa selvittämään mitkä mallissa esiintyvät parametrit ovat dominoivia. Tehdyn analyysin perusteella saadaan myös selville ne parametrit, joiden vaikutus laskentamallin kokonaistulokseen on vähäisin. (Nellimo & Uusi-Rauva, 2005)

Tässä tutkimuksessa herkkyysanalyysi tehdään taulukossa 3 esitetyille moduuli- ja lohkovarustelun kokonaiskestoille. Tämän avulla pystytään vertailemaan eri varustelutyyppien kestossa tapahtuvan muutoksen vaikutusta varustelun kokonaiskestoajaan. Herkkyysanalyysia käytetään lisäksi tutkimuksessa valituissa työaikakertoimissa tapahtuvan muutoksen arvioimiseen. Tämän avulla saadaan arvioitua varustelukertoimien epävar-

muuden vaikutusta laskentamallin avulla määritettyihin uuden konseptin mukaisiin varustelutyötunteihin.

4.2.4 Mallinnusajo ja analysointi

Mallin testaaminen ja mallinnusajo suoritettiin seuraavassa kappaleessa esitetyn Case-tutkimuksen avulla. Varsinaista vertailupohjaa tulosten oikeellisuudelle ei työssä saatu, koska mallissa käytetyt varustelun toiminnonkestit ovat telakalta saadun tiedon pohjalta ennustettuja lukuarvoja.

Mallin tulosten analysointi on erittäin tärkeä työvaihe. Tulosten perusteella nähdään riittävätkö mallinnuskerrat vai tarvitaanko niitä lisää.

4.2.5 Dokumentointi ja raportointi

Laskentamallin dokumentointi voidaan jakaa kahteen osaan; ohjelma- ja projektidokumentointiin (Banks, 2005). Tässä tutkimuksessa ohjelmadokumentointia esiintyy laskentakaavojen ja mallin toiminnasta kerrotun tiedon välityksellä. Projektidokumentoinnissa projektin eteneminen ja päätökset esitetään kronologisessa järjestyksessä. Tätä tutkimusta voidaan pitää kokonaisuudessaan projektidokumentointina.

5 Case-tutkimus

Tässä kappaleessa esitellään Case- tutkimuksessa käytetyt parametrit ja tulokset. Kappale on jaettu neljään osaan; ensimmäisessä osassa kuvaillaan AHS:n tämän hetkiset lohkovarustelun tavoitteet ja käytössä olevat lohkoitoimitusmallit. Tässä osiossa luodaan myös katsaus Helsingin telakan edellisten laivaprojektien lohkovarustelun onnistumiseen ja vertaillaan arvoja tämän vuosituhannen alkupuolella saavutettuihin arvoihin. Toisessa osiossa määritetään lohkoitoimitusmallin vaikutus varustelun tuntijakaumaan sekä rakennustapaan ja tämän pohjalta määritetään mallissa käytettävät lähtömuuttujat. Kolmannessa osiossa esitetään case-tutkimuksen varsinaiset tulokset. Kappaleen viimeisessä osiossa suoritetaan saaduille tuloksille herkkyyshanalyysi.

5.1 Lohkovarustelu lohkoitoimittajalla

Laivanrakennusprosessin kesto voidaan lyhentää kahdella eri tapaa; lyhentämällä runkotuotantoon käytettävää aikaa tai vähentämällä aluevaiheessa tehtävää varustelua (Ennis, et al., 1998). Aluevaiheen varustelun läpimenoaikaa voidaan puolestaan lyhentää lohkovarusteluastetta nostamalla. Tästä syystä varustelutyön kehittämiseen ja lohkovarustelun onnistumisen varmistamiseen lohkoitoimittajalla on syytä panostaa.

5.1.1 Lohkovarustelun vaihtoehtoiset toimintatavat

AHS:n tämän hetkisen tuotantostrategian mukaisesti laivaprojektien runkolohkot pyritään tilaamaan varusteltuina globaaleilta telakkamarkkinoilta, mistä ne toimitetaan proomulla tai lohkokuljetuksia varten valmistetulla aluksella Helsinkiin. Telakka on kokeillut useaa eri rakennustapaa lohkojen toimitukseen liittyen. Yleisin käytössä ollut strategia on kuljettaa valmiit runkolohkot EML ja EMS varusteltuina lohkoitoimittajalta Helsinkiin. Tällöin lohkoja ei ole maalattu, joten maalaustyö ja JMS varustelu on tehty AHS:n toimesta Helsingissä. Yleisesti tätä toimintamallia käytettäessä myös osa EMS vaiheessa runkolohkoon asennettavasta varustelutyöstä on tekemättä. Tällöin kyseinen varustelu suoritetaan Helsingin telakalla loppuun lohko- tai aluevarusteluvaiheessa. Helsingin telakalla tehtävää täydentävää lohkovarustelua nimitetään tässä työssä EMV varusteluksi.

Toinen käytössä ollut strategia on maalattujen EML ja EMS varusteltujen runkolohkojen kuljettaminen AHS:lle. Tällöin pyritään varmistamaan, että suurin osa kuumavarustelutyöstä saadaan tehtyä lohkoitoimittajalla ennen lohkon maalausta.

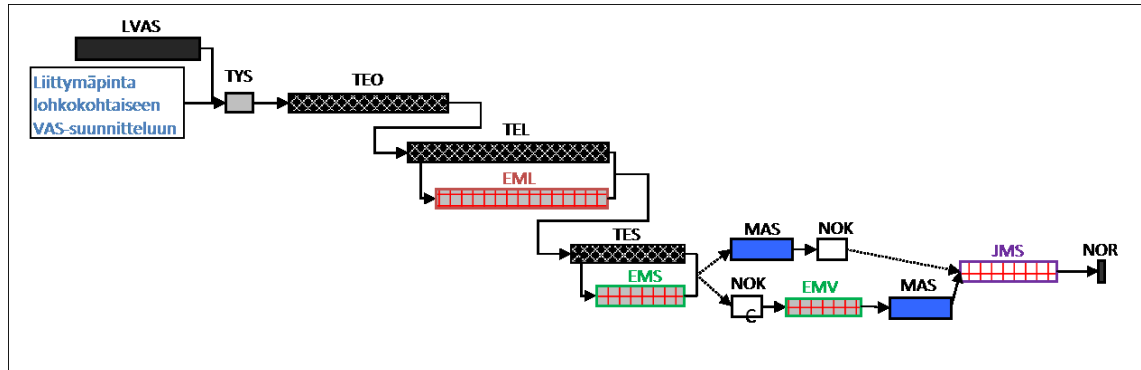
Tämän jälkeen runkolohko toimitetaan Helsingin telakalle JMS varustelua varten. Vaihtoehtoisesti lohkoimittajalla voidaan tehdä osalohkoja, jolloin lohkoitehtaalla tehdään osalohkovarustelua. Tämän jälkeen maalaamattomat lohkot kuljetetaan Helsinkiin EMV jatkovarustelua varten. (Nousiainen, 2014) Yleisesti tätäkin strategiaa käytettäessä runkolohkojen EMS varustelua ei ole saatu vietyä loppuun lohkoimittajalla. Tämän seurauksena EMS vaiheen kuumavarustelua joudutaan tekemään maalattuihin runkolohkoihin, mikä johtaa maalin tuhoutumiseen ja epämukaviin työskentelyolosuhteisiin.

Lohkovarustelun joustavuuden varmistamiseksi aikataulukriittiset lohkot on eräissä laivaprojekteissa rakennettu esikootuista paneeleista Helsingin telakalla. Tätä toimintatapaa käytettäessä esikootut paneelit valmistetaan lohkoitehtaalla, mistä ne kuljetetaan telakalle rekoilla tai meriteitse proomulla. Tällöin lohkovarustelutyö tehdään kokonaisuudessaan Helsingissä. Tämän toimintatavan käytöllä lohkovarustelutyöstä saadaan joustavampaa ja lohkovarustelua päästään tekemään Helsingin telakalla aikaisemmassa vaiheessa.

Ongelmaksi lohkoimituksissa on osoittautunut lohkovarusteluasteen alhaisuus ja lohkojen laatuongelmat niiden saapuessa lohkoimittajalta. Lohkovarusteluasteen alhaisuuteen kerrotaan syyksi valmistussuunnitelmien myöhästyminen ja lohkoimittajan sitoutumattomuus tehtävään lohkovarustelutyöhön. Varustelun epäonnistuminen lohkoimittajalla nostaa varustelutyön kustannuksia, koska varustelutyötä joudutaan suorittamaan Helsingissä työtehokkuuden kannalta epäedullisessa vaiheessa. AHS:n yksi suurimmista kilpailuvalteista on laivaprojektin läpivieminen tiukassa aikataulussa. Tämän seurauksena lohko- ja rungonkoontia ei voida pysäyttää varustelusuunnitelmien tai lohkovarustelun puutteellisuuden vuoksi. Lohkovarusteluasteen nostaminen tukee laivaprojektin läpiviemistä tiukassa aikataulussa. (Nousiainen, 2014)

Lohkoimittajan vapaata valintaa rajoittaa AHS:n toisen osaomistajan USC:n (United Shipbuilding Corporation) vaatima venäläisen työn minimiosuus eli ”venäläisyysaste” laivaprojektista. Tästä syystä osa laivan terästyöstä on lähes välttämätöntä tilata Venäjän telakoilta. Tämä luo lisähaasteita lohkovarustelun onnistumiselle johtuen itänaapurin poikkeavasta rakennustavasta.

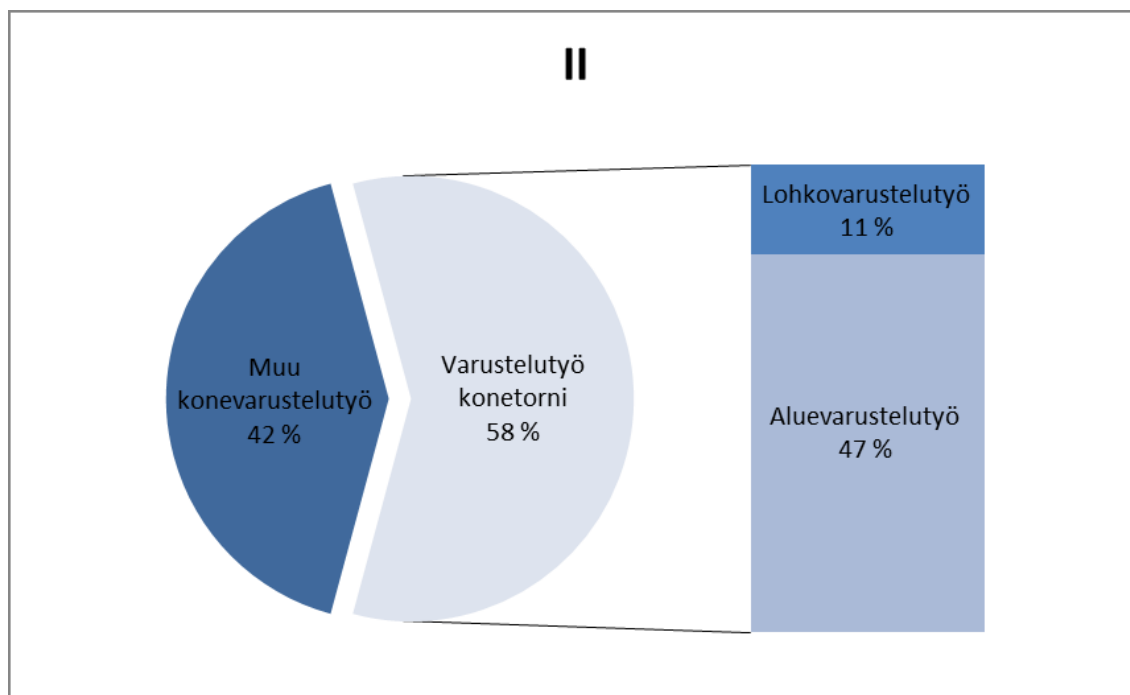
Kuvassa 10 on esitetty miten edellä mainitut lohkovarustelun eri toiminnot limittyvät runkolohkon esimerkituotantokaaviossa ja missä vaiheessa lohkojen valmistussuunnittelun (LVAS) sekä työsuunnittelun (TYS) tulee olla valmiina. Esimerkituotantokaaviossa kuvataan lohkoitoimitusmallia, missä EMS varustellut runkolohkot kuljetetaan joko maalattuina tai maalaamattomina lohkoitehtaalta Helsingin telakalle. Esimerkituotantokaaviossa työsuunnittelun valmistuttua alkaa lohkoitehtaalla osavalmistus ja -koonnit (TEO). Tästä seuraava työvaihe on lohkokoonniti (TEL), jonka yhteydessä aloitetaan ennen maalausta lohkokoon varustelu (EML). Lohkokoonnitiä seuraava terästyövaihe on suurlohkokoonniti (TES) ja kyseisen terästyövaiheen rinnalla aloitetaan ennen maalausta runkolohkokoon varustelu (EMS). Runkolohkojen valmistuttua lohkot joko maalataan (MAS) lohkoitehtaalla tai kuljetetaan (NOK) maalaamattomina Helsinkiin. Maalaamattomina Helsinkiin toimitetuille lohkoille tehdään täydentävää ennen maalausta lohkovarustelua (EMV). EMV varustelun valmistuttua lohkot maalataan.. Tämän jälkeen Helsingin telakalla suoritetaan vielä jälkeen maalauksen varustelu (JMS) ennen runkolohkon nostoa osaksi rakenteilla olevan laivan runkoa (NOR).



Kuva 10 Runkolohkon tuotantokaavio Helsingin telakalla (Havas, 2014)

5.1.2 Helsingin telakan nykytilanne

Kuvassa 11 on esitetty erään laivaprojektin konetornin (kuva 1) eli pumppuhuoneen, konehuoneen ja konekuilun lohkovarustelutunnit suhteessa konetornin aluevarustelun tunteihin ja laivaprojektin konealueiden kokonaisvarustelutunteihin.

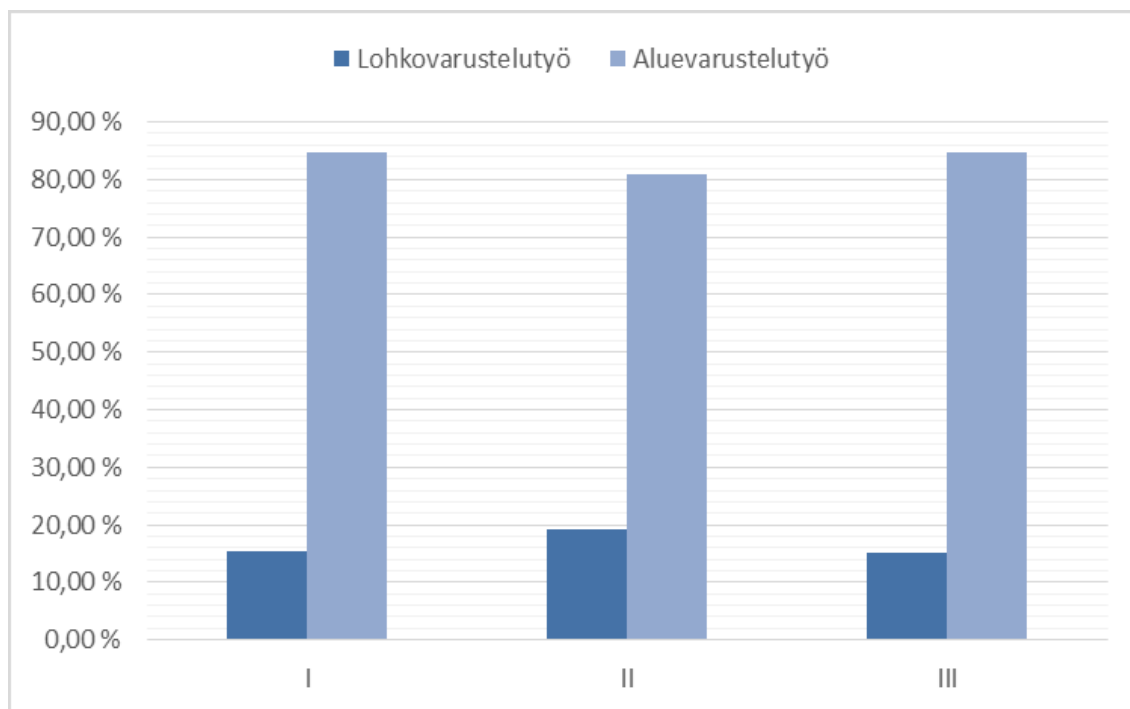


Kuva 11 Laivaprojektin varustelutuntien jakautuminen (Tuokkola, 2014)

Kuten kuvasta havaitaan on erittäin perusteltua keskittyä alkupään varustelun kehittämisessä nimenomaisesti konetornin varustelutunteihin, koska nämä kattavat 58 % koko arktisen työlaivan konevarustelutunneista. Konevarustelutunnit mukaan luettuna käyttöönotto ja merikokeet muodostavat puolestaan keskimäärin noin 62 % varustelun kokonaistunneista Helsingin telakalla (Havas, 2014). Konetornin varustelutyö on lisäksi Helsingin telakalla pääsääntöisesti valmistettavien arktisten työalusten projektiaikataulun kriittisellä polulla.

Helsingin telakalla käytettiin vielä tämän vuosituhannen alkupuolella 40 % konevarustelun tunneista lohkovaiheessa. Tämä tarkoitti, että noin 80 - 85 % varustepainosta saatiin asennettua jo kyseisessä rakennusvaiheessa. Pääsyynä lohkovarustelun onnistumiselle pidetään Helsingin telakalla lohkotuotantoa, joka vielä 2000-luvun alussa tehtiin kokonaisuudessaan Helsingin telakalla. Tästä syystä lohkovarustelutyö oli joustavampaa ja sen kokonaishallinta paremmalla tasolla (Tuokkola, 2014). Terästuotannon siirtämistä alihankintatelakoille ei kuitenkaan voida pitää ainoana syynä alkupäävarustelutason alhaisuuteen. Esimerkiksi Helsingin telakalla on parhaimmillaan koko separaattorihuoneen varustelu suoritettu kolmella rakenneyksiköllä (Tuokkola, 2014). Tänä päivänä Helsingin telakalla käytetään rakenneyksiköitä varustelun tehostamiseksi hyvin vähän.

Kuten kuva 12 osoittaa, edellisissä laivaprojekteissa lohkovarusteluun käytettävät tunnit kattavat 15 - 19 % konetornin varusteluun käytettävistä työtunneista. Tällä työmäärällä saadaan asennettua vain noin 10 % varusteista lohkovaiheessa. Minimitavoitteena tulevaisuudessa voidaankin pitää vähintään samalle lohkovarustelutasolle pääsyä, mikä Helsingin telakalla on tämän vuosituhatosen alkupuolella saavutettu. Tämä tarkoittaa, että noin 40 % varustelun kokonaistunneista tulisi tehdä lohkovarusteluvaiheessa.



Kuva 12 Konetornin lohko- ja aluevarustelutuntien keskinäinen suhde Helsingin telakan toteutuneissa laivaprojekteissa (Havas, 2014)

Kuvassa 12 laivaprojekti I:n konetornin lohkot toimitettiin lohkodehtaalta runkolohkoina Helsingin telakalle. Laivaprojekti II:n pumppuhuoneen ja konehuoneen lohkot koottiin Helsingissä esikootuista paneeleista. Konetornin lohkoista vain konekuilun runkolohko tehtiin lohkodehtalla ennen toimitusta AHS:lle. Laivaprojekti III:n pumppuhuoneen lohko- ja runkolohkokokoonti tehtiin Helsingin telakan tuotantotiloissa esikasatuista paneeleista. Konetornin muut kaksi lohkoa toimitettiin runkolohkoina lohkodehtojen tuotantotiloista. Yllä esitetyn kuvaajan perusteella eri lohkodehtomallit eroavat varustelutuntien jakauman perusteella hyvin vähän toisistaan.

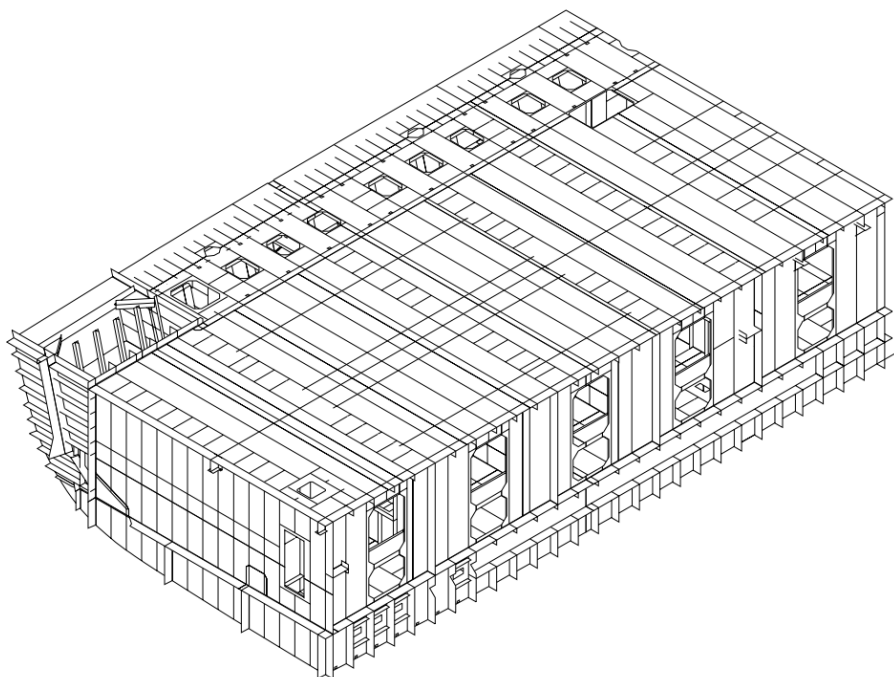
5.1.3 Tutkittavat lohkodehtomallit

Tutkimuksen pohjaksi luotiin viisi eri lohkodehtomallia. Kyseiset mallit on luotu Rakennustapaan KPT-konseptissa liittyvän kirjallisuustutkimuksen sekä Helsingin tela-

kalta saatujen tietojen perusteella. Kaikki viisi eri mallia ovat strategisesti kokoonpanotelakkakonseptiin sopivia. Näiden toimitusmallien sopivuus Helsingin telakan tuotantostrategiaan varmistettiin vielä asiantuntija haastatteluiden pohjalta. Tässä työssä tutkitavat lohkotoimitusmallit ovat:

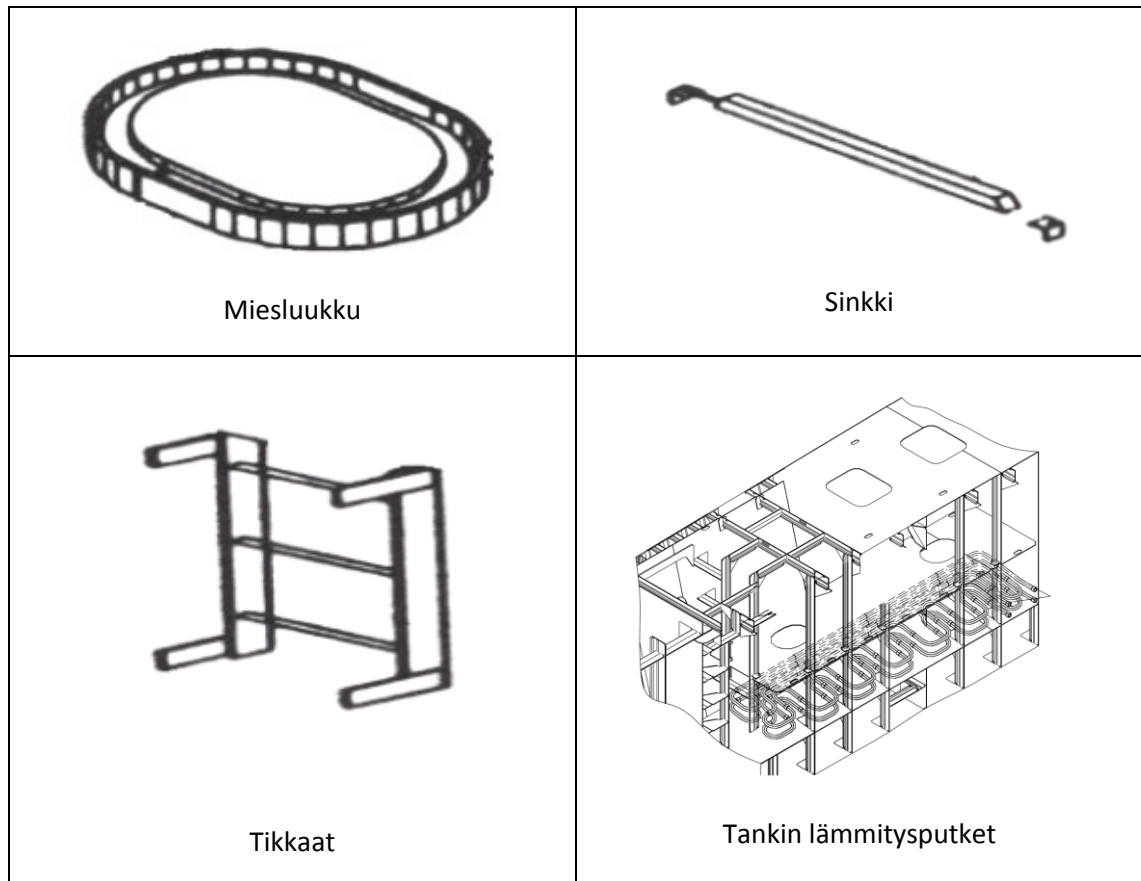
1. EML ja EMS varusteltujen umpinaisten runkolohkojen toimitus Helsinkiin
2. EML varusteltujen päältä avonaisten runkolohkojen toimitus Helsinkiin
3. EML varusteltujen osalohkojen toimitus Helsinkiin
4. Avonaisten osalohkojen toimitus Helsinkiin
5. Esikoottujen teräspaneelien toimitus Helsinkiin

Umpinainen puolen laivan levyinen pumppuhuoneen runkolohko on esitetty kuvassa alla (kuva 13). Kuvan runkolohko koostuu kaksoispohjasta, kansilevystä, pystylapioista ja kahdesta laitatankista. Tätä lohkotoimitusmallia kuvataan tässä tutkimuksessa nimellä umpinaiset runkolohkot.



Kuva 13 Umpinainen pumppuhuoneen runkolohko

Umpinaisen runkolohkon varustelun tulisi olla hyvin pitkällä ennen sen toimitusta Helsinkiin. Kuten kuva yllä osoittaa, lohkon laita- ja kaksoispohjatankkeihin kulku on hankalaa. Tämä näkyy suoraan työn tehokkuudessa. Myöskään suuria moduuleita ei päästä nostamaan, koska lohko on päältä suljettu. Tästä syystä vähintään tankkivarusteet, turkkitasot ja laitealustat tulee asentaa paikalleen lohkotoimittajalla viimeistään runkolohkokoonnin yhteydessä. Tankkivarusteilla tarkoitetaan tässä työssä tankkiin tulevia putkia, tikkaita, askelmia, käsikahvoja, sinkkianodeita ja miesluukkuja. Esimerkki miesluukusta, sinkistä, tikkaista ja laivan polttoainetankin lämmitysputkista on esitetty kuvassa alla (kuva 14). JMS vaiheessa lohkoon tehtävän varustelun suorittaminen suuria rakenneyksiköitä käyttäen ei myöskään onnistu, koska lohko on päältä suljettu.



Kuva 14 Laivaan asennettavia tankkivarusteita (Ozkok & Helvacioglu, 2013)

Päältä avonainen laivan poikkileikkauksen käsittävä pumppuhuoneen runkolohko on esitetty alla (kuva 15). Tämä lohkotoimitusmalli nimetään tutkimuksessa nimellä avonaiset runkolohkot. Päältä avonaiseen runkolohkoon voidaan asentaa varustelua nosturin avulla vielä Helsingin telakalla. Tästä syystä avonaisen runkolohkon varustelua voidaan tehdä tehokkaasti moduulien avulla vielä lohkotoimituksen jälkeenkin EMV tai JMS vaiheessa. Tankkivarusteet tulisi kuitenkin asentaa lohkotoimittajan tiloissa vii-

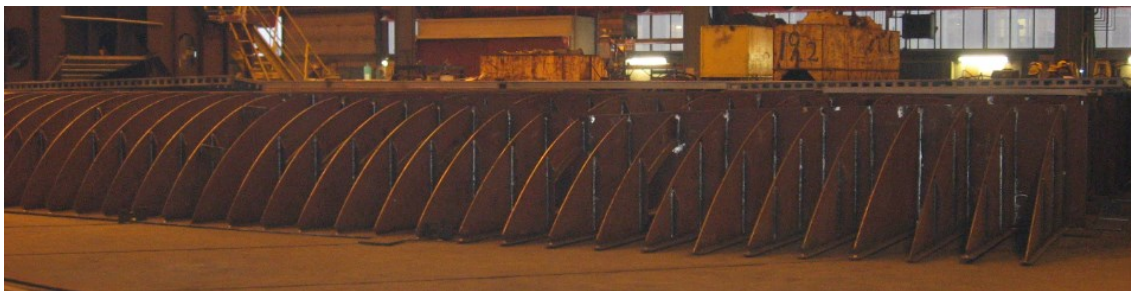
meistään runkolohkokoonnin yhteydessä, jotta voidaan varmistaa työn oikea- aikainen ja tehokas suorittaminen.



Kuva 15 Pumppuhuoneen avonainen runkolohko

EML varusteltujen osalohkojen lohkotoimitusmallia kuvataan tässä työssä nimellä ehjät osalohkot. Yksi esimerkki kyseisestä vaihtoehdosta on kaksoispohjan käsittävä osalohko. Tämä osalohko maalattuna on esitetty kuvassa 3. Osalohkon varustelua voidaan jatkaa Helsingissä ilman että työtehokkuus kärsii. Kuitenkin kaksoispohjan tai laitatan- kin käsittävään osalohkoon, tankkivarustelun on syytä olla tehtynä. Esimerkiksi osaloh- kon kaksoispohjaan tulevien putkien asennus osalohkokoonnin jälkeisessä työvaiheessa vie resursseja hukkaan.

Neljäs vaihtoehto lohkojen toimitukselle lohkotehtaalta on avonaisten osalohkojen toi- mitus Helsinkiin. Kyseistä mallia kuvataan tässä tutkimuksessa nimellä avonaiset osalohkot. Tämä lohkotoimitusmalli on esitetty kuvassa 16. Kuvassa on kaksoispohjan osalohko ilman pohjanahkaa. Tätä mallia käytettäessä voidaan tankkivarustelua jatkaa Helsingissä tehokkaasti, koska esimerkiksi kaksoispohjan putkivarustelua päästään te- kemään ennen kaksoispohjan pohjanahan asennusta.



Kuva 16. Kaksoispohjan osalohko ilman pohjanahkaa

Viides vaihtoehto (esikootut paneelit) teräsrakenteiden toimittamiseen lohkotoimittajalta on esitetty kuvassa 17. Lohkotoimittajan valmistaessa vain esikootut paneelit, lohko koonti siirtyy kokonaisuudessaan lohkotoimittajan tiloista AHS:n tuotantotiloihin. Lohkokoonnin siirtyessä Helsinkiin, siirtyy myös EML varustelutyö tehtäväksi Helsingin telakalle. Edellä kuvattua toimitusmallia käytettäessä terästyön hinta nousee, mutta vastapainoksi varustelutyöstä muodostuu joustavampaa ja varustelua päästään tekemään aikaisemmassa työvaiheessa. Terästyön hinnan nousua voidaan perustella lohko- ja runkolohkokoonnin siirrolla halvemman työvoiman lohkotehtaalta Suomeen, Helsingin telakalle.



Kuva 17 Esikoottu paneeli

5.1.4 Lohkotoimitusmallien rakennustavat

Lohkotoimitusmallin vaikutusta laivan rakennustapaan on kuvattu taulukossa 5. Kyseisessä taulukossa varustelutoiminnot jaetaan lohkotoimittajalla ja Helsingin telakalla suoritettavaan alkupään varusteluun. Varustelun jaksot on jaettu EML, EMS, EMV, JML ja JMS-vaiheisiin. Taulukon avulla pyritään selventämään, missä jaksoissa eri varusteet tulee asentaa eri lohkotoimitusmalleissa. Taulukon viimeisessä sarakkeessa ku-

vataan varustelun pääperiaatteet. Tässä sarakkeessa kuvataan kuinka hyvin moduuleja pystytään eri lohkotoimitus vaihtoehtoissa hyödyntämään Helsingin telakalla. Sarakkeessa myös kuvataan miten tehokkaasti lohkotoimittajalla mahdollisesti kesken jäänyt EML ja EMS-varustelu saadaan Helsingin telakalla vietyä loppuun lohkovarusteluvaiheessa. Lohkotoimittajan toimittaessa lohkoja vaihtoehtojen 1 - 3 mukaisesti olisi varmistettava, että tankkivarustelu saadaan tehtyä lohkotoimittajan tuotantotiloissa. Tankkivarustelun tekeminen Helsingin telakalla suljetuissa tankeissa on työtehokkuuden kannalta alhaista myös runkolohkon varusteluvaiheessa.

Moduulit rakennetaan lohkokoonnista irrallaan Helsingin telakan tuotantohalleissa tai vaihtoehtoisesti ostetaan alihankintaverkostosta kokonaistoimituksena. Nostetaan ja asennetaan lohkoihin EMV tai JMS vaiheessa.

Taulukko 5. Rakennustavan kuvaus eri lohkotoimitusvaihtoehtoilta

Lohkotoimitusmalli	Lohkotoimittajalla suoritettava varustelu	Helsingin telakalla suoritettava varustelu	Varustelun pääpiirteet
Umpinaiset runkolohkot	EML ja EMS tankkivarustelu: miesluukut, tikkaat, askelmat, käsikahvat, sinkkianodit, kaapeliradat, esivalmisteputket ja putkiläpiviennit. Muu EMS varustelu: laitealustat, eristyspiikit ja turkkitasot	On suoritettava lohkokotehtaalla tekemättä jäänyt EMS varustelu loppuun umpinaiseen runkolohkoon EMV varusteluna. JMS vaiheen varustelussa asennetaan koneikot, laitteet ja putkiradat.	Helsingin telakalla ei päästä käyttämään hyväksi suuria rakenneyksiköitä JMS varustelussa, koska lohkot päältä suljettu. Tästä syystä myös EMS varustelun loppuunsaattaminen on hidasta. Lohkokotehtaalla kesken jäänyt tankkivarustelu on hidasta suorittaa loppuun suljetuissa tankeissa AHS:lla.
Avonaiset runkolohkot	EML ja EMS tankkivarustelu: miesluukut, tikkaat, askelmat, käsikahvat, sinkkianodit, kaapeliradat, kanavat, esivalmisteputket ja putkiläpiviennit. Muu EML ja EMS varustelu: laitealustat, eristyspiikit ja turkkitasot.	On suoritettava lohkokotehtaalla tekemättä jäänyt EMS varustelu loppuun. EML varustelu runkolohkojen irtonaisiin kattoihin eli tasolohkoihin. JMS vaiheen varustelussa asennetaan koneikot, laitteet ja putkiradat. Käytetään suuria rakenneyksiköitä hyväksi.	Helsingin telakalla päästään käyttämään hyväksi suuria rakenneyksiköitä JMS varustelussa, koska lohkot ovat päältä avonaisia. Tästä syystä myös EML ja EMS varustelun loppuunsaattaminen tehostuu. Kaksoispohjan tankkivarustelu on suoritettava lohkotoimittajalla. Irtonaisten kattolohkojen varustelu tehdään jalkoasennossa.

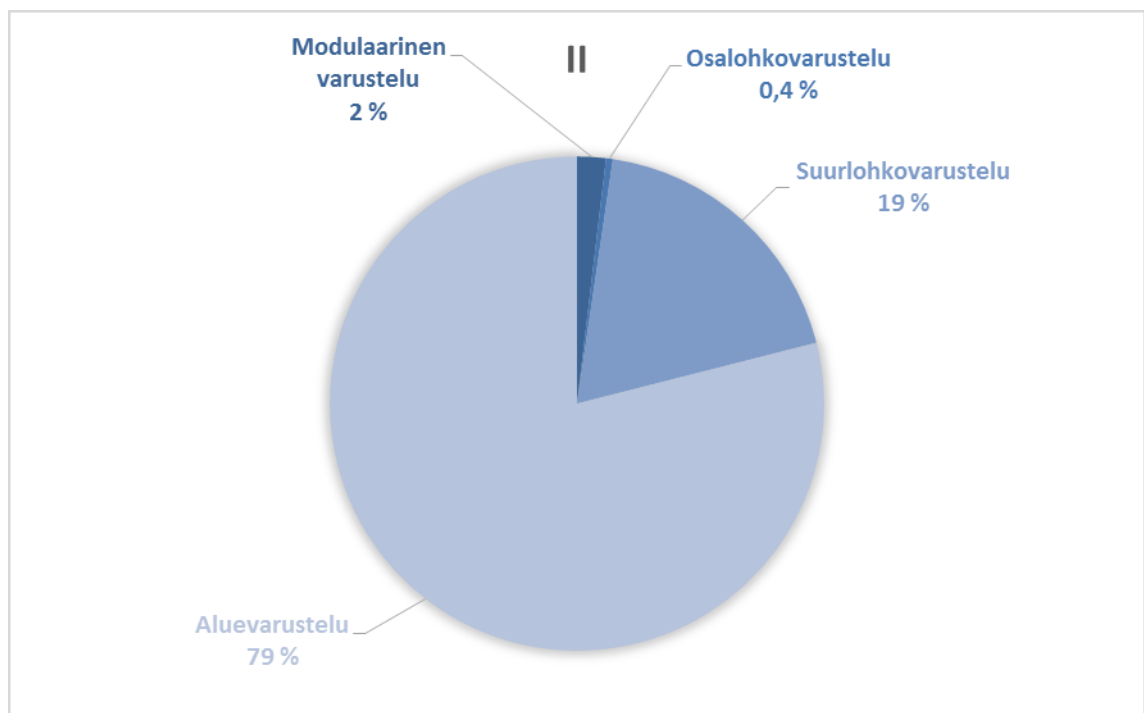
Lohkotoimitusmalli	Lohkotoimittajalla suoritettava varustelu	Helsingin telakalla suoritettava varustelu	Varustelun pääpiirteet
Ehjät osalohkot	EML tankkivarustelu: miesluukut, tikkaat, askelmat, käsikahvat, sinkkianodit, esivalmisteputket (kaksoispohjan tankit) ja putkiläpiviennit. Muu EML varustelu: eristyspiikit.	On suoritettava loh-kotehtaalla kesken jäänyt EML varustelu loppuun osalohkoihin tai EMV vaiheessa runkolohkoihin. Asennetaan kaapeliradat ja kanavat lohkojen kattoihin EML vaiheessa sekä putkiradat EMV vaiheessa. Koneikot ja rakenneyksiköt EMV ja JMS vaiheessa.	Osalohkojen tankit päältä suljettuja, mikä rajoittaa kesken jääneen tankkivarustelun tehokkuutta AHS:lla. EML varustelua päästään tekemään jalkoasennossa katto osalohkoihin. Rakennustapa perustuu pitkälti moduuleiden (koneikot ja rakenneyksiköt) käyttöön AHS:lla JMS vaiheessa. Katto- tasolohkot yhdistetään mahdollisimman myöhään runkolohkoihin.
Avonaiset osalohkot	EML tankkivarustelu: miesluukut, tikkaat, askelmat, käsikahvat, sinkkianodit, putkiläpiviennit. Muu EML varustelu: eristyspiikit.	On suoritettava loh-kotehtaalla kesken jäänyt EML varustelu loppuun osalohkoihin tai EMV vaiheessa runkolohkoihin. Asennetaan kaapeliradat ja kanavat irtotaisiin lohkojen kattoihin jalkoasennossa ja putkiradat EMV vaiheessa runkolohkoihin. Koneikot ja rakenneyksiköt EMV ja JMS vaiheessa.	Tankkivarustelun loppuunsaattaminen tehokasta AHS:lla päältä avonaisiin tankkeihin. Helsingin telakalla käytetään hyväksi rakenneyksiköitä jo EMV vaiheessa. Rakenneyksiköihin liitetään turkkitasot. Putket asennetaan putkipaketteina sovitteita lukuun ottamatta. Rakennustapa perustuu pitkälti moduuleiden käyttöön AHS:lla.
Esikootut paneelit	Ei tehdä varustelua lohkotoimittajalla.	Asennetaan tasolohkovaiheessa putkikannakkeet ja läpiviennit. EML vaiheessa miesluukut, tikkaat, askelmat, käsikahvat, sinkkianodit, kaapeliradat ja putkiläpiviennit. EMS vaiheessa asennetaan putkiradat ja kanavat. JMS vaiheessa käytetään rakenneyksiköitä (laitteet + sähkökaapit + koneikot).	AHS:lla vastuu koko lohkovarusteluprosessista. Varustelu aloitetaan jo tasolohkovaiheessa. Lohkojen kattovarustelu jalkoasennossa EML vaiheessa. Tankkivarustelu suoritetaan viimeistään EMV vaiheessa. EMV ja JMS varustelu toteutetaan rakenneyksiköiden ja koneikoiden avulla varusteluhalleissa.

5.2 Lohkotoimitusmallin vaikutus varustelun tunteihin

Tässä kappaleessa tutkitaan kappaleessa 5.1.3 esiteltyjen lohkotoimitusmallien vaikutusta laivan varustelutunteihin, kun osa lohkotehtaalla tehtävästä varustelutyöstä siirtyy Helsingin telakalle tehtäväksi. Laskennan pohjana käytetään tutkimuksessa luotua varustelun laskentamallia.

Tutkimuksessa oletetaan, että kaikilla vaihtoehtoisilla lohkotoimitusmalleilla alkupään varusteluun käytetään noin 40 % varustelun kokonaistunneista. Lohkotoimittajalla tehtävä alkupään varustelutyö määritetään Helsingin telakan edellisten laivaprojektien toteutuneiden tuntien perusteella. Tutkimuksessa lähdetään siitä olettamuksesta, että edellisissä laivaprojekteissa saavutettu lohkovarustelutaso lohkotoimittajalla pysyy ennallaan.

Erään laivaprojektin toteutunut varustelutuntien jakauma on esitetty kuvassa 18. Esitettyä laivaprojektia käytetään uuden konseptin mukaisten varustelutuntien laskennan pohjana eli referenssiprojektina kappaleessa 5.3. Tätä määritettyä pohjaa käytetään taulukossa 3 esitetyn laskentamallin sarakkeen B täyttämiseksi.



Kuva 18 Laivaprojektin toteutunut varustelutyön tuntijakauma

5.2.1 Laskentamallin lähtömuuttujien määrittäminen

Ennen varsinaista laskentamallin käyttöä täytyy eri lohkotoimitus vaihtoehdoille määrittää lähtömuuttujat, kuten kappaleessa 4.2.2 on todettu. Valitut parametrit lähtömuuttujiksi on esitetty taulukossa 6. Kasvattamalla alkupään varusteluun käytettäviä tunteja 72 %:lla päästään kappaleessa 5.2 määritettyyn lohkovarustelun minimimitavoite osuuteen kokonaisvarustelun tunneista (40 %). Kasvattamalla referenssiprojektin (kuva 18) alkupään varustelun tunteja edellä mainitulla 72 %:lla, saadaan alkupään varustelun tuntien osuus koko varustelun tunneista kasvatettua 40 %:in.

Taulukko 6. Laskentamallin lähtömuuttujat eri lohkotoimitusvaihtoehdoille

Kuvaus	Muuttuja	Vaihtoehto 1	Vaihtoehto 2	Vaihtoehto 3	Vaihtoehto 4	Vaihtoehto 5
Alkupään varustelun muutos		72 %	72 %	72 %	72 %	72 %
Moduulivarustelun osuus alkupään varustelusta	X	5 %	20 %	30 %	35 %	35 %
Tasolohkovarustelun osuus alkupään varustelusta	Y	1 %	2 %	5 %	15 %	25 %
Lohkovarustelun osuus alkupään varustelusta	Z	94 %	78 %	65 %	50 %	45 %

Toimitettaessa EML ja EMS-varusteltuja umpinaisia runkolohkoja Helsinkiin (vaihtoehto 1), valittiin moduulivarustelun osuudeksi 5 % ja tasolohkovarustelun osuudeksi 1 % Helsingissä tehtävästä alkupään varustelusta. Varustelutoimintojen eri osuudet kaikissa viidessä eri lohkotoimitusvaihtoehdoissa perustuvat Helsingin telakan tietokantojen ja haastatteluiden perusteella määritettyihin prosenttilukuihin. Tämän lisäksi kunkin rakennustavan alkupäänvarustelua rajoittavat tekijät ovat huomioitu. Moduulivarustelun rajoittavia tekijöitä on päältä umpinainen runkolohko. Umpinaiseen runkolohkoon moduuleiden ja rakenneyksiköiden paikalleen nostaminen on hidasta ja haastavaa. Suurien rakenneyksiköiden nosto lohkoon ei enää tässä vaiheessa onnistu. Tasolohkovarustelun osuus konetornin varustelun tunneista määritettiin toteutuneiden laivaprojektien perusteella. Lohkovarustelun osuudeksi alkupään varustelusta määräytyi moduuli -ja koneikovarustelun sekä tasolohkovarustelun määrittämisen jälkeen 94 %.

Avonaisiin runkolohkoihin voidaan moduulivarustelua tehdä vielä Helsingin telakalla tehokkaasti, koska lohkoon voidaan nostaa varusteita ilman esteitä. Tästä syystä moduu-

livarustelun osuudeksi tässä toimitusmallissa valittiin 20 %. Tämän lisäksi esimerkiksi irrallisena tasolohkona toimitettavaan konehuoneen kattoon päästään tekemään tasolohkovarustelua jalkoasennossa. Tästä syystä tasolohkovarustelun osuudeksi alkupään varustelusta valitaan tässä lohkoimitusmallissa 2 %.

EML-varusteltujen ehjien osalohkojen toimitus Helsinkiin mahdollistaa tehokkaan varustelun jatkamisen Helsingin päässä. Osalohkoissa ei ole esteitä moduuleiden nostamiselle ja asentamiselle. Moduulivarustelun osuudeksi on tässä toimitusmallissa valittu 30 %. Lohkotoimittajan toimittaessa osalohkoja päästään tasolohkovarustelua tekemään pumppu- ja konehuoneen kattoon sekä konekuilulohkon laipioihin. Tästä syystä tasolohkovarustelun osuudeksi on valittu tässä lohkoimitusmallissa 5 %.

Avonaisten osalohkojen varustelu, esimerkiksi ilman pohjanahkaa toimitettavat kaksoispohjan osalohkot, on tässä tutkimuksessa ajateltu tasolohkovarusteluksi. Tämän seurauksena tasolohkovarustelun osuus alkupään varustelutunneista kasvaa ehjien osalohkojen tapaukseen nähden kymmenellä prosentilla. Moduulivarustelun osuudeksi valittiin tässä lohkoimitusmallissa 35 %.

Lohkotoimittajan toimittaessa esikoottuja teräspaneeleita Helsinkiin, tehdään varustelu kokonaisuudessaan Helsingin telakalla. Näin varustelun kokonaishallinta on omissa käsissä ja työstä saadaan joustavampaa. Tästä syystä kyseisen lohkoimitusmallin lähtömuuttujiksi valittiin Helsingin telakan kannalta parhaat parametrit. Moduulivarustelun osuus alkupään varustelun tunneista on tässä mallissa 35 % ja tasolohkovarustelun osuus 25 %.

5.3 Tulokset

Laskentamalliin syötetyt arvot ja laskentamallin avulla saadut tulokset on esitetty liitteessä 3 suhdelukuina. Esityksestä on jätetty pois taulukossa 3 esitetyt sarakkeet A ja C sekä sarakkeen D työtunnit on korvattu suhdeluvuilla. Laskennassa on käytetty kappaaleessa 4.2.2 esitettyä lohkovarustelun laskentamallia ja kaavoja (1 - 10).

Taulukossa 7 on kuvattu uuden mallin mukaiset varustelun osuudet kokonaisvarustelusta suoritettua laskennan jälkeen. Laskennan pohjana käytetyn referenssiprojektin varustelutoimintojen tuntijakauma on kuvattu kappaaleessa 5.2 (kuva 18).

Taulukko 7. Varustelutuntien osuus kokonaisvarustelusta laskennan jälkeen

Toiminnon kuvaus	Umpinaiset runkolohkot	Avonaiset runkolohkot	Ehjät osalohkot	Avonaiset osalohkot	Esikootut paneelit
Varustelutoimintojen osuus kokonaisvarustelusta laskennan jälkeen					
Moduulivarustelun osuus	3 %	6 %	8 %	10 %	10 %
Tasolohkovarustelun osuus	1 %	1 %	2 %	4 %	5 %
Lohkovarustelun osuus	39 %	39 %	38 %	36 %	35 %
Aluevarustelun osuus	57 %	54 %	52 %	51 %	50 %
Yhteensä	100%	100%	100%	100%	100%

Taulukossa 6 esitetyillä lähtömuuttujien parametreilla saadaan eri lohkoitoimitusvaihtoehtoilta taulukossa 8 esitetyt varusteluvaihtoehtojen keston muutokset verrattuna laskennan pohjana käytettyyn referenssiprojektiin. Taulukossa on tämän lisäksi esitetty konetornin varustelun kokonaistyömäärän muutos eri lohkoitoimitusmalleille, mikä on tämän tutkimuksen kannalta tärkein mittari lohkojen toimitusmallia valittaessa.

Taulukko 8. Eri varustelutoimintojen keston muutos laskennan jälkeen ja konetornin varustelun keston kokonaismuutos

Toiminnon kuvaus	Umpinaiset runkolohkot	Avonaiset runkolohkot	Ehjät osalohkot	Avonaiset osalohkot	Esikootut paneelit
Varustelutoimintojen muutos					
Moduulivarustelun muutos	40 %	160 %	240 %	280 %	280 %
Tasolohkovarustelun muutos	34 %	68 %	170 %	511 %	681 %
Lohkovarustelun muutos	76 %	63 %	52 %	40 %	36 %
Aluevarustelun muutos	-40 %	-46 %	-50 %	-53 %	-54 %
Varustelun kokonaistyömäärän muutos					
Konetornin kokonaistyömäärän muutos	-17 %	-21 %	-25 %	-27 %	-28 %

Taulukoissa 7 ja 8 esitetyt tulokset varustelutoiminnoittain on kuvattu tarkemmin seuraavissa kappaleissa.

Moduulivarustelu

Taulukossa 8 esitetty moduulivarustelun kasvu jokaisessa vaihtoehdossa on suurta (40 %, 160 %, 240 %, 280 %, 280 %). Erityisen suurta kasvua on havaittavissa, kun lohkot

toimitetaan Helsinkiin käyttäen lohkoimitusvaihtoehtoja 2 - 5 (avonaiset runkolohkot, ehjät osalohkot, avonaiset osalohkot, esikootut paneelit). Muutoksen suuruus johtuu Helsingin telakan alhaisesta rakenneyksiköiden käytöstä tällä hetkellä.

Edellä kuvatulla moduulivarustelun muutoksella kyseisen varustelutoiminnon osuus koko alkupään varustelusta vaihtelee lohkoimitusmallista riippuen 3 % - 10 % (taulukko 7).

Tasolohkovarustelu

Tasolohkovarustelun muutokseksi eri lohkoimitusvaihtoehdoille (taulukko 8) saatiin hyvin suuria arvoja (34 %, 68 %, 170 %, 511 %, 681 %). Tasolohkovarustelua lohkoimittajan tuotantotiloissa on tehty edellisissä Helsingin telakan laivaprojekteissa hyvin vähän. Tästä johtuen tasolohkovarustelun kasvu vaikuttaa yllättävän suurelta. Kuitenkin laskettujen tulosten perusteella (taulukko 7) tasolohkovarustelun osuudeksi varustelutoiminnoista tulee lohkoimitusmallista riippuen 1 % - 5 %. Tämä tason saavuttaminen tulevaisuudessa Helsingin telakalla on mahdollista. Erityisesti lohkoimitusvaihtoehdossa 5 Helsingin telakan varusteluosaaminen saataisiin kunnolla käyttöön ja tasolohkovarustelua päästäisiin tekemään tasolohkovaiheessa huomattavasti enemmän, kuin lohkoimittajan tiloissa on edellisissä projekteissa tehty.

Lohkovarustelu

Lohkovarustelun muutos (taulukko 8) saa suurimman arvonsa toimitettaessa umpinaisia runkolohkoja (76 %) ja pienimmän arvonsa toimitettaessa esikoottuja paneeleita (36 %). Umpinaisten runkolohkojen tapauksessa tämä on seurausta varustelutyön painottumisesta lohkovarusteluvaiheeseen, koska lohkoimittajan tiloissa ei tasolohkovarustelua päästä kasvattamaan. Umpinaiset runkolohkot myös rajoittavat moduulivarustelun käyttöä, minkä johdosta sen osuus jää pieneksi. Vaihtoehdossa 5 varustelutyötä on jaettu enemmän moduuli- ja tasolohkovarustelulle, koska tasolohkokoonnin siirtyessä Helsingin telakalle päästään varustelua tekemään aikaisemmassa varusteluvaiheessa.

Lohkovarustelun osuus kokonaisvarustelusta on vaihteluväliltään hyvin pientä lohkoimitusmallien välillä (taulukko 7). Umpinaisten runkolohkojen tapauksessa lohkovarustelun osuus on 39 % ja esikoottujen paneelien tapauksessa kyseisen varustelutoiminnon osuus on 35 %. Muiden lohkoimitusmallien lohkovarustelun osuus kokonais-

varustelusta osuu edellä kuvatun vaihteluvälin sisään. Määritetty lohkovarustelun osuus työtunneista on saavutettavissa tulevilla laivaprojekteissa.

Aluevarustelu

Aluevarustelun muutos on kaikissa viidessä lohkoitoimitusmallissa (taulukko 8) erittäin suuri (-40 %, -46 %, -50 %, -53 %, -54 %). Suurin syy tähän muutokseen on lohkovarustelutuntien oletettu kasvu 40 %:in konetornin kokonaisvarustelutunneista, kun lohkovarustelutunnit Helsingin telakan edellisissä laivaprojekteissa ovat vaihdelleet 15 % - 19 % välillä. Alkuperäin varustelutuntien kasvattaminen näkyy aluevarustelutuntien pienenemisenä. Aluevarustelun osuus pienenee sen myötä mitä enemmän terästyötä siirretään lohkoitoimittajan tuotantotiloista AHS:lle. Toimitettaessa umpinaisia runkolohkoja (lohkoitoimitusvaihtoehto 1) on aluevarustelun osuus 57 % koko varustelusta (taulukko 7). Toimitettaessa esikoottuja paneeleita Helsinkiin on aluevarustelun osuus enää 50 % kokonaisvarustelusta (taulukko 7).

Konetornin varustelun kokonaistyömäärä

Konetornin varustelun kokonaistyömäärän muutos suhteessa referenssiprojektiin on tutkimustulosten kannalta tärkeimmässä asemassa. Kyseisten varustelutuntien väheneminen näkyy konetornin kokonaistyömäärän laskuna. Kasvattamalla alkuperäin varusteluun käytettäviä tunteja lohkoitoimitusmallien sallimissa rajoissa, laskevat konetornin kokonaisvarustelutunnit huomattavasti (-17 %, -21 %, -25 %, -27 %, -28 %), kuten taulukko 8 osoittaa.

Konetornin kokonaisvarustelutuntien väheneminen riippuu siitä, kuinka paljon varustelutunteja saadaan aluevarusteluvaiheesta siirrettyä moduuli-, taso- ja lohkovarusteluvaiheisiin. Kokonaisvarustelun vähenemiseen vaikuttaa myös se kuinka aikaisessa vaiheessa eri varustelutehtävät saadaan suoritettua.

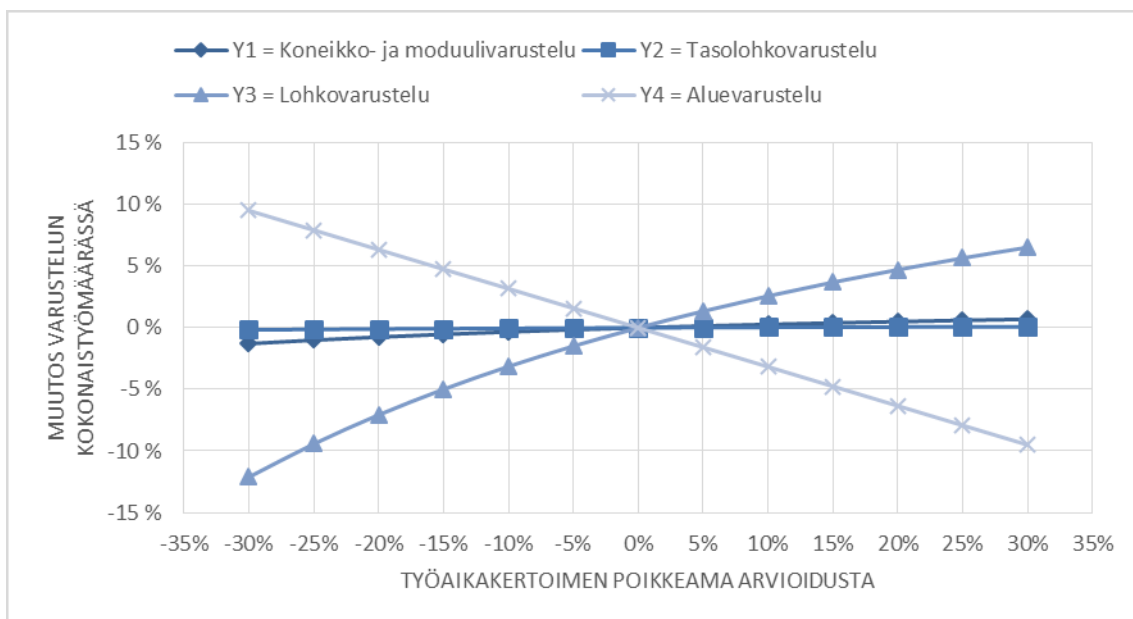
5.4 Tulosten herkkyyden arviointi

Tulosten herkkyyden arvioimiseksi mallinnetaan tutkimuksessa käytettyjen työaikakertoimien (taulukko 2) ja määritettyjen varusteluvaiheiden (taulukko 3) parametrien muutoksen vaikutusta laskentamallin lopputulokseen eli konetornin varustelukeston muutokseen, joka on esitetty kappaleessa 5.3 (taulukko 8) eri lohkoitoimitusvaihtoehdoille. Työaikakertoimien ja varusteluvaiheiden parametreille valittiin sama vaihteluväli +/- 30 % herkkyyksianalyysin toteuttamista varten.

5.4.1 Työaikakertoimet

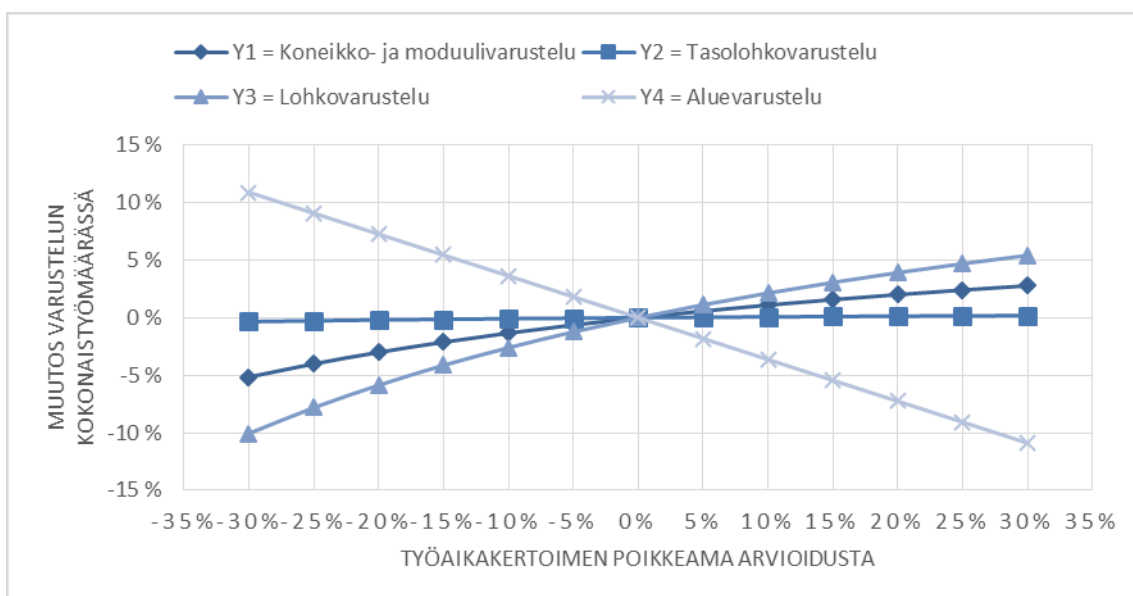
Työaikakertoimien Y_1 , Y_2 , Y_3 ja Y_4 vaihtelua välillä $\pm 30\%$ on mallinnettu kuvassa 19 umpinaisten runkolohkojen tapaukselle. Kuvaajasta nähdään, että konetornin varustelu-keston muutokseen vaikuttavat eniten työaikakertoimet Y_3 ja Y_4 . Jos aluevarustelun työaikakerroin vähenee 30% , konetornin varustelun kokonaistyömäärä kasvaa 10% :lla kappaleessa 5.3 esitetystä arvosta (taulukko 8). Jos taas lohkovarustelun työaikakerroin pienenee 30% , konetornin varustelun kokonaistyömäärä vähenee yli 10% :lla. Umpinaisten runkolohkojen tapauksen lopputulos on herkkä työaikakertoimien Y_3 ja Y_4 vaihteluille, kuten kuvasta 19 voidaan havaita. Alue- ja lohkovarustelun työaikakertoimien vaikutus umpinaisten runkolohkojen varustelun kokonaistyömäärään on merkittävin, koska varustelu painottuu tässä toimitusmallissa kyseisiin varustelutoimintoihin.

Työaikakertoimen Y_4 kulmakerroin on negatiivinen, koska aluevarustelun tunnit vaikuttavat päinvastaisesti konetornin varustelutunteihin suhteessa moduuli-, taso- ja lohkovarusteluun. Aluevarustelun työaikakertoimen kasvaessa (Y_4), muiden työaikakertoimien pysyessä vakioina (Y_1 , Y_2 , Y_3), konetornin kokonaisvarustelutunnit vähenevät prosentuaalisesti. Työaikakertoimien Y_1 , Y_2 ja Y_3 muodostamat käyrät ovat puolestaan kulmakertoimeltaan positiivisia, koska niiden kasvaessa mallinnettu kokonaisvarustelu-aika kasvaa. Aluevarustelun (Y_4) työaikakertoimen käyrä on lineaarinen, koska muuttuja Y_4 esiintyy yhtälön (7) kaikissa tekijöissä osoittajassa. Työaikakertoimet (Y_1 , Y_2 , Y_3) esiintyvät yhtälön (7) eri tekijöiden nimittäjissä, joten niiden muodostamasta käyrästä muodostuu epälineaarinen.



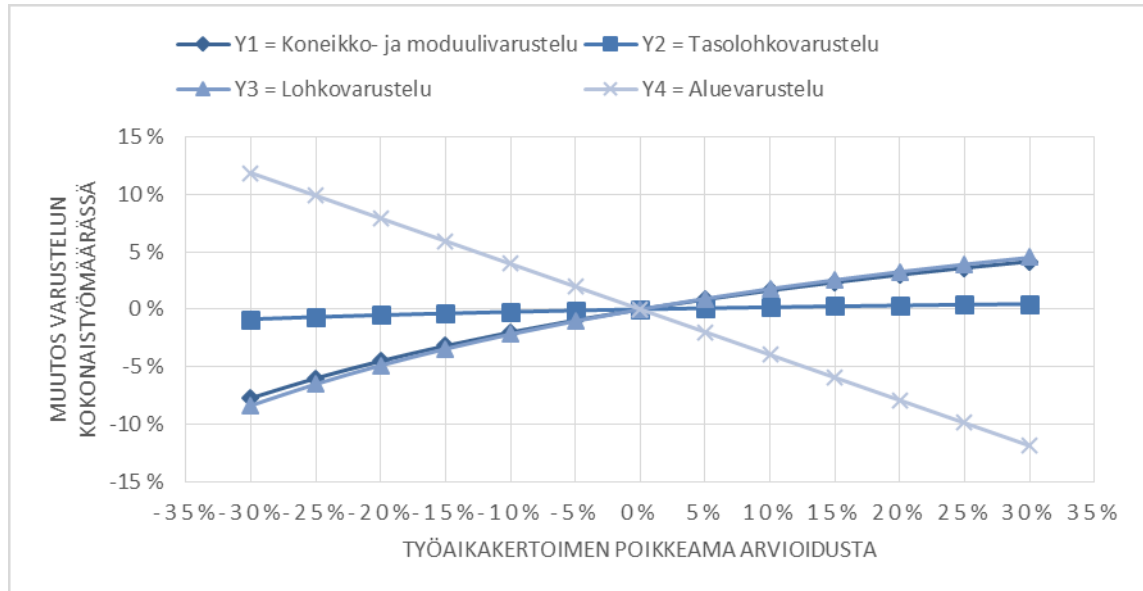
Kuva 19 Työaikakertoimien herkkyyden vaikutus konetornin kokonaisvarustelu-aikaan umpinaisten runkolohkojen tapauksessa

Työaikakertoimien herkkyyden vaikutus avonaisten runkolohkojen tapaukseen on esitetty kuvaajassa alla (kuva 20). Tässä vaihtoehdossa konetornin varustelutuntien kokonaismuutokseen vaikuttaa eniten alue- ja lohkovarustelun työaikakertoimet. Aluevarustelun työaikakertoimen pienentyessä 30 %:lla, konetornin varustelun kokonaistyömäärä kasvaa 11 %:lla. Toisaalta myös moduulivarustelukertoimen Y_1 epävarmuus vaikuttaa lopputulokseen. Kyseisen työaikakertoimen pienentyessä 30 %, vähenee konetornin varustelutunnit 5 %:lla.



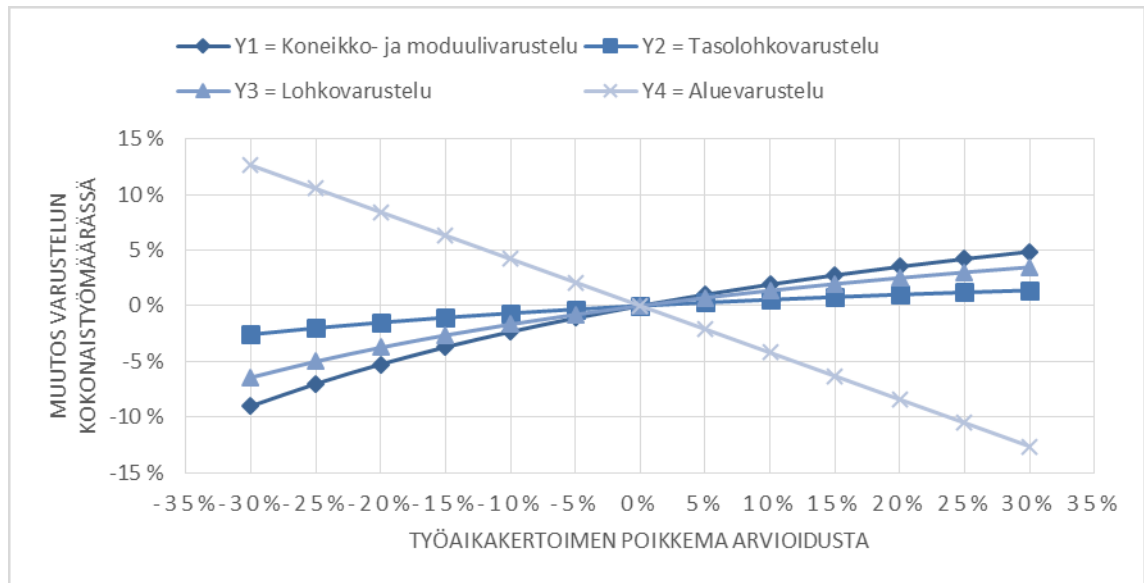
Kuva 20 Työaikakertoimien herkkyyden vaikutus konetornin kokonaisvarustelu-aikaan avonaisten runkolohkojen tapauksessa

Kuvassa 21, kuvassa 22 ja kuvassa 23 on määritetty työaikakertoimien vaikutusta ehjien osalohkojen, avonaisten osalohkojen ja esikoottujen paneeleiden laskentatuloksiin. Edellä esitettyjen kuvaajien tapaan, aluevarustelun työaikakertoimella (Y₄) on suurin vaikutus konetornin varustelun kokonaistyömäärään.



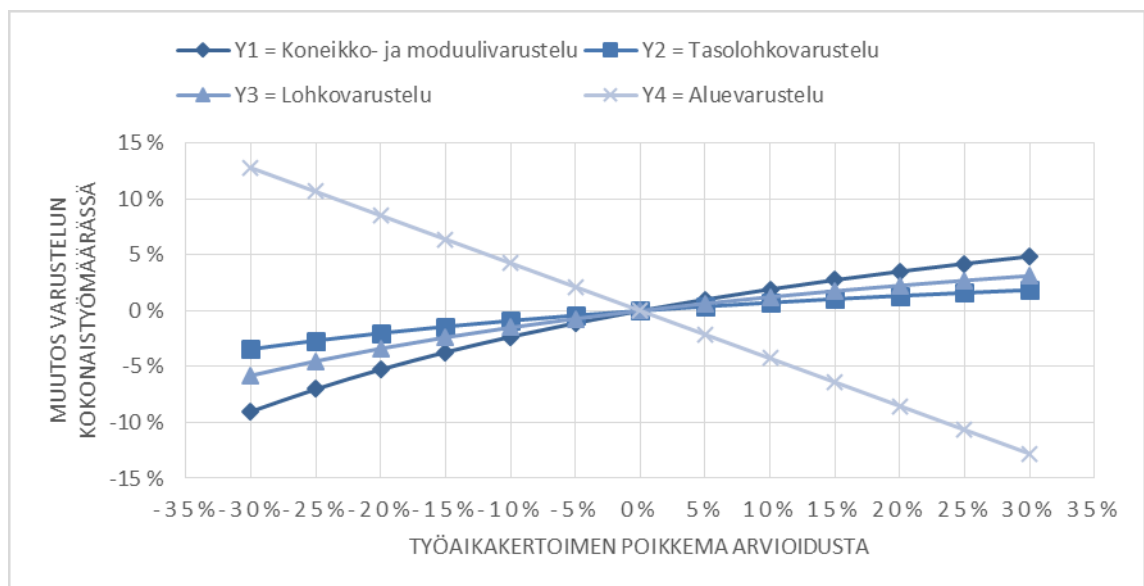
Kuva 21 Työaikakertoimien herkkyys vaikutus konetornin kokonaisvarustelu-aikaan ehjien osalohkojen tapauksessa

Ehjien ja avonaisten osalohkojen tapauksissa (kuva 21, kuva 22) tasolohkovarustelun työaikakertoimen epävarmuudella ei ole merkittävää vaikutusta lopputuloksiin. Tasolohkovarustelun osuus varustelutyöstä on molemmissa edellä mainituissa lohkotoimitusvaihtoehdoissa vähäistä. Kyseessä olevissa lohkotoimitusvaihtoehdoissa moduuli- ja lohkovarustelun työaikakertoimien epävarmuuden vaikutus konetornin varustelun kokonaismuutokseen on noin puolet aluevarustelun työaikakertoimen vaikutuksesta. Kyseisten työaikakertoimien vaikutus lopputulokseen on kuitenkin päinvastainen aluevarustelun työaikakertoimeen nähden, kuten edellä on todettu.



Kuva 22 Työaikakertoimien herkkyyden vaikutus konetornin kokonaisvarustelu-aikaan avonaisten osalohkojen tapauksessa

Esikoottujen paneeleiden tapauksessa (kuva 23) erot työaikakertoimien herkkyyden välillä kapenevat. Tämä on seurausta varustelutehtävien osuuden tasoittumisesta varustelutyön painottuessa enemmän Helsingin telakalle.



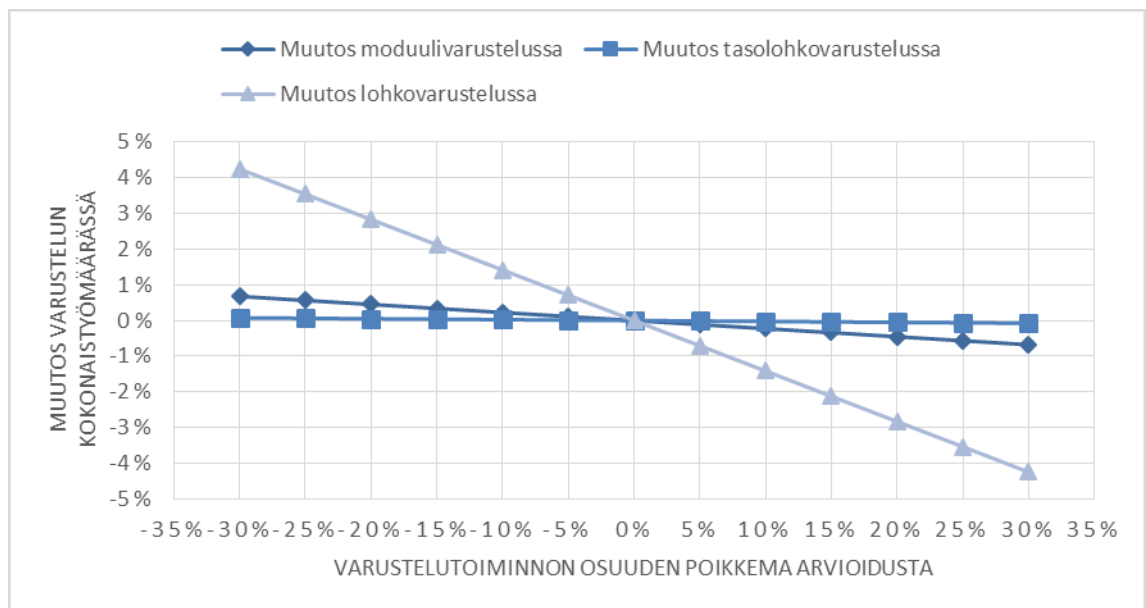
Kuva 23 Työaikakertoimien herkkyyden vaikutus konetornin kokonaisvarustelu-aikaan esikoottujen paneeleiden tapauksessa

5.4.2 Varustelutoiminnot

Varustelutoimintojen herkkyyden arvioimiseksi valittiin muuttujiksi muutos moduulivarustelussa, muutos tasolohkovarustelussa ja muutos lohkovarustelussa. Näiden varustelutoimintojen keston pohjautuen määritetään aluevarustelun kesto. Tästä syystä alueva-

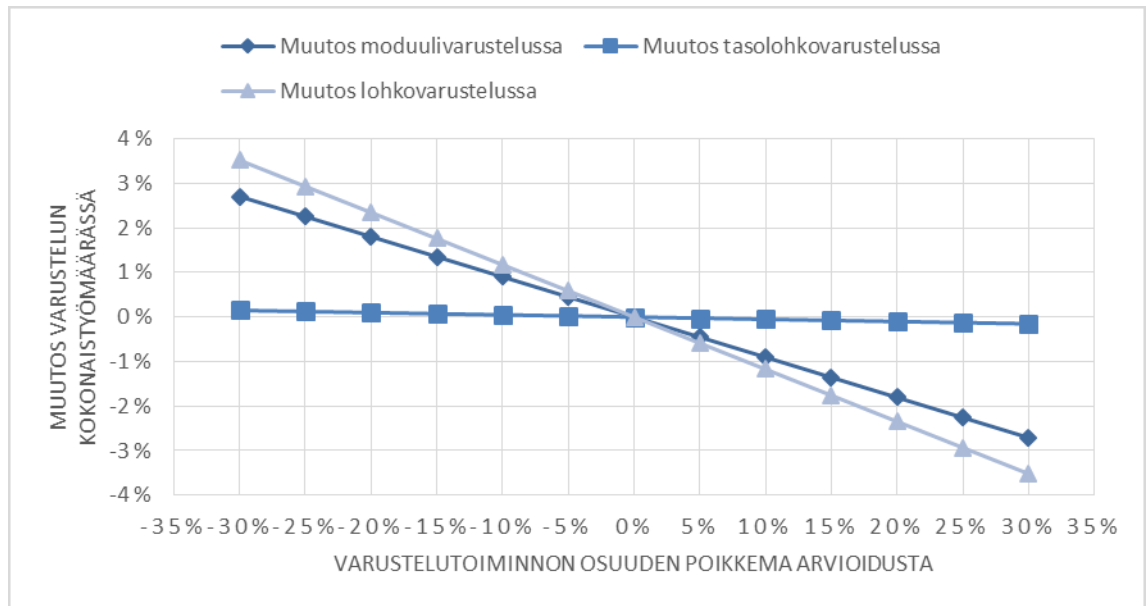
rustelun muutos on riippuvainen edellä mainituista varustelutoiminnoista, joten sen herkkyyttä ei erikseen työssä määritetä.

Kuvaajassa alla on esitetty (kuva 24) varustelutoiminto parametrien vaihtelun vaikutus konetornin kokonaisvarustelu-aikaan umpinaisten runkolohkojen tapauksessa. Kuvaajasta huomataan, että lohkovarustelun muutoksella on merkittävin vaikutus konetornin varustelutuntien kokonaismuutokseen. 30 %:n muutos lohkovarustelun osuudessa, laskee konetornin varustelutuntien kokonaismuutosta noin neljällä prosentilla.



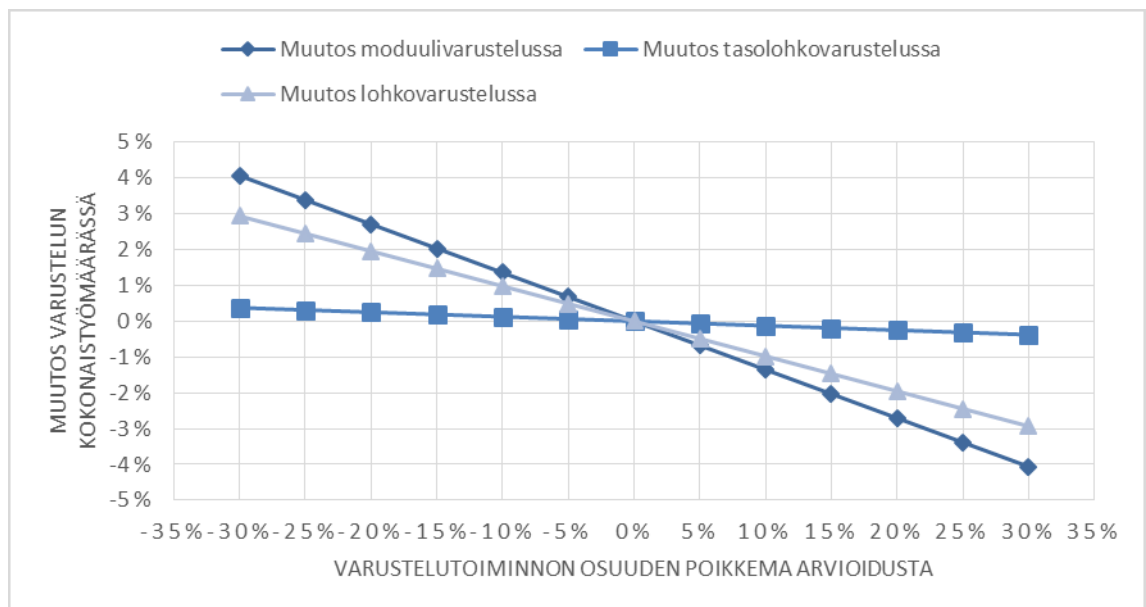
Kuva 24 Varustelutoimintojen herkkyyden vaikutus konetornin kokonaisvarustelu-aikaan umpinaisten runkolohkojen tapauksessa

Avonaisten runkolohkojen herkkyyksianalyysikuvaajasta (kuva 25) havaitaan, että lohkovarustelulla on tässäkin tapauksessa suurin vaikutus. Konetornin varustelun kokonaismuutokseen lohkovarustelun vaikutus on maltillisempi. Tässä toimitus vaihtoehdossa myös moduulivarustelulla on vaikutusta lopputulokseen.

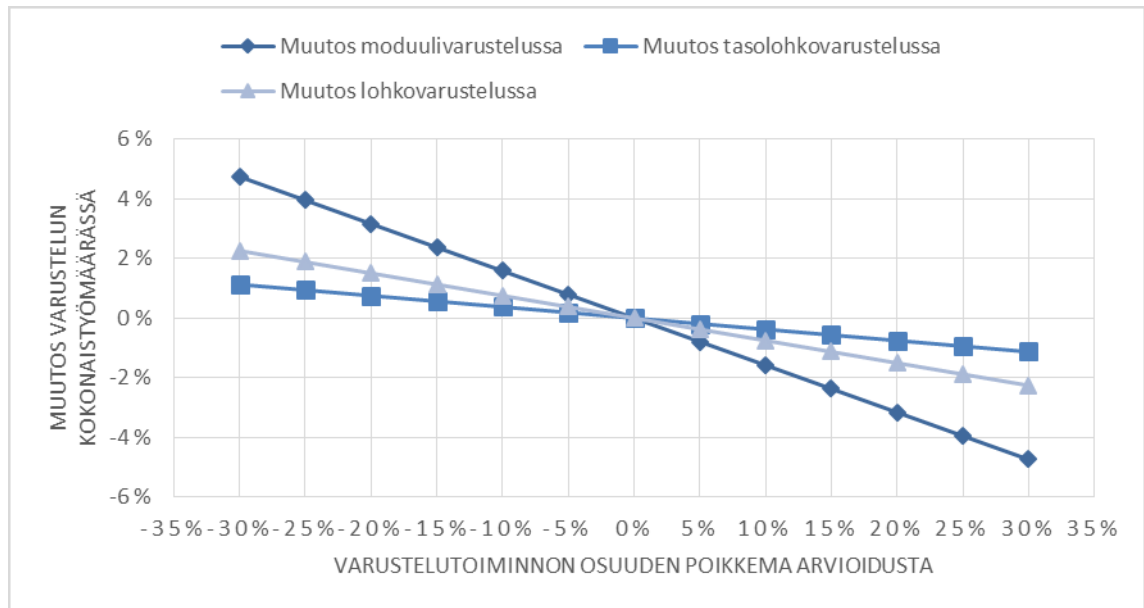


Kuva 25 Varustelutoimintojen herkkyiden vaikutus konetornin kokonaisvarustelu-aikaan avonaisen runkolohkojen tapauksessa

Ehjen osalohkojen tapauksessa moduuli- ja lohkovarustelun parametreilla on yhtä suuri vaikutus konetornin kokonaisvarustelu-aikaan (kuva 26). Puolestaan muutos tasolohkovarustelussa ei kyseisessä vaihtoehdossa juuri vaikuta lopputulokseen.

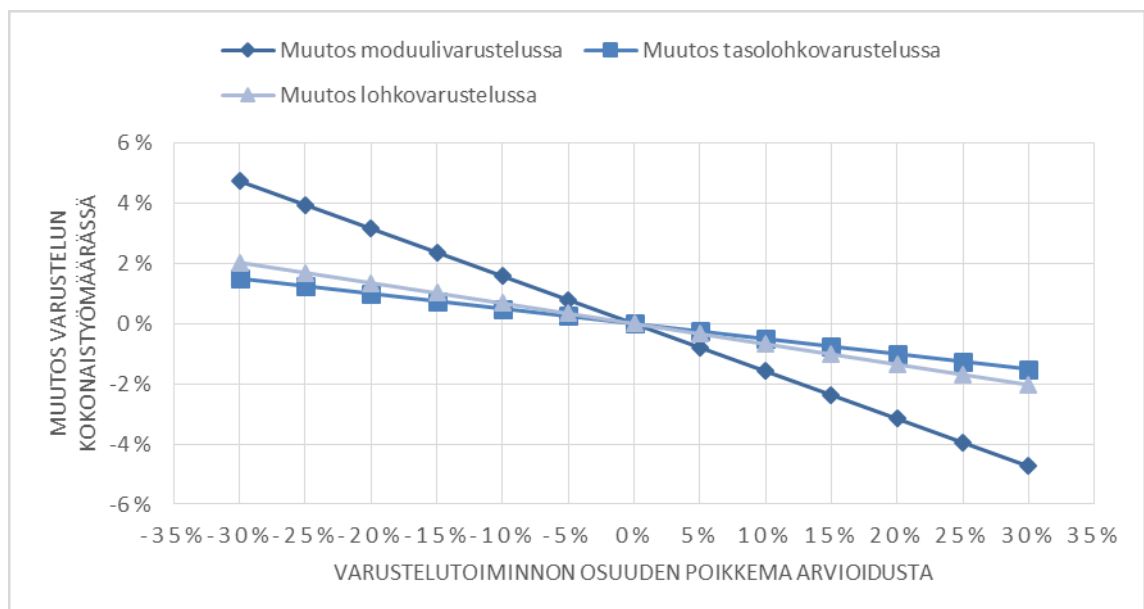


Kuva 26 Varustelutoimintojen herkkyiden vaikutus konetornin kokonaisvarustelu-aikaan ehjen osalohkojen tapauksessa



Kuva 27 Varustelutoimintojen herkkyyden vaikutus konetornin kokonaisvarustelu-aikaan avonaisten osalohkojen tapauksessa

Avonaisten osalohkojen ja esikoottujen paneeleiden tapauksissa (kuva 27, kuva 28) moduulivarustelulla on suurin vaikutus lopputuloksiin. Näissä vaihtoehtoissa myös tasolohko- ja lohkovarustelun muutokset vaikuttavat keskimäärin molempine tapauksien konetornin kokonaisvarustelu-aikoihin. Molemmissa vaihtoehtoissa varustelun kokonaistyömäärä vaihtelee noin $\pm 5\%$:n välillä, moduulivarustelun osuuden vaihdellessa $\pm 30\%$:n välillä.



Kuva 28 Varustelutoimintojen herkkyyden vaikutus konetornin kokonaisvarustelu-aikaan esikoottujen paneeleiden tapauksessa

6 Pohdinnat

Tässä kappaleessa analysoidaan tutkimuksessa käytetyn laskentamallin epävarmuustekijöitä ja pohditaan case-tutkimuksessa esiteltyjen viiden lohkotoimitusmallin soveltuvuutta Helsingin telakalla sovellettavaan kokoonpanotelakkakonseptiin. Tämän lisäksi kappaleessa kuvaillaan eri lohkotoimitusmalleihin liittyviä riskejä sekä vertaillaan tutkimuksessa saatuja tuloksia aikaisempaan tutkimukseen.

6.1 *Laskentamenetelmän epävarmuuden tarkastelu*

Työssä luotu laskentamenetelmä pohjautuu eri varustelutoimintojen välisiin työaikakertoimiin. Nämä työaikakertoimet määritettiin tässä tutkimuksessa kirjallisuuden ja asiantuntijahaastatteluiden pohjalta. Kyseiset työaikakertoimet perustuvat arvioihin ja niiden oikeellisuuden luotettava varmistaminen on varustelun tilastollisen puutteen vuoksi haasteellista. Telakan sisällä esiintyi myös vaihtelua työaikakertoimia kysyttäessä eri henkilöiltä. Erityisen suurta vaihtelua oli havaittavissa aluevarustelun ja moduulivarustelun välisen työaikakertoimen määrittämisessä sekä kirjallisuudessa että Helsingin telakalla. Mainituista syistä johtuen, tutkimuksessa päädyttiin valitsemaan laskentamallissa käytetyt työaikakertoimet konservatiivisesti.

Varustelutyön hypoteettisesti maksimaalisen säästöpotentiaalin määrittämiseksi päädyttiin tutkimuksessa mallintamaan ehjien osalohkojen lohkotoimitusmallia aluevarustelun työaikakertoimen (Y_4) arvolla 7. Tätä arvoa käytettäessä kyseisessä toimitusmallissa, konetornin varustelun kokonaistyömäärä väheni 54%:lla referenssiprojektiin nähden. Ehjien osalohkojen kokonaistyömäärä voi siis potentiaalisesti vähentyä vielä 29% taulukossa 8 esitetystä arvosta, jos aluevarustelun työaikakertoimenä käytetään kerrointa 7.

Laskentamallissa valittujen varustelutoimintojen (moduulivarustelu, tasolohkovarustelu, lohkovarustelu ja aluevarustelu) osuudet kokonaisvarustelusta perustuvat arvioihin. Arviointi perustuu telakalta saatuihin tilastoihin ja työnsuunnittelijoiden haastatteluihin. Näiden parametrien oikeellisuus voidaan tulevaisuudessa varmistaa empiirisen tutkimuksen avulla, keräämällä tarkkaa statistiikkaa varustelutuntien jakautumisesta eri varustelutoiminnoille.

Laskentamallin pohjana käytetyn referenssiprojektin tuntijakaumaa voidaan pitää lohko- ja aluevarusteluntien osalta luotettavana. Konetornin lohkokoonnti lukuun ottamatta konekuilun lohkoa ja lohkovarustelu suoritettiin kyseisessä projektissa Helsingin telakalla. Tästä syystä eri varusteluvaiheisiin käytetyistä tunneista on taltioitu luotettavaa statistiikkaa.

Kappaleessa 5.4 esitetty tulosten herkkyyshanalyysi laskentamallissa käytetyille parametreille osoittaa, että parametrien mahdollinen epävarmuus ei muuta saatujen tulosten luonnetta. Kaikissa tapauksissa konetornin varustelun kokonaistuntimäärä pienenee referenssiprojektiin nähden.

6.2 Lohkotoimitusmallit kokoonpanotelakkakonseptissa

Lohkotoimitusmallien 2 - 5 (avonaiset runkolohkot, ehjät osalohkot, avonaiset osalohkot, esikootut paneelit) soveltaminen Helsingin telakalla vaatii hieman muutoksia tämän hetkisiin kokoonpanotelakkakonseptin toimintatapoihin. Ostettaessa lohkotoimittajalta päältä avonaisia runkolohkoja, osalohkoja tai esikasattuja paneeleita, Helsingin telakalla tehtäisiin tulevaisuudessa lohkokoonntia rungonkoonntin rinnalla.

Erityisesti esikoottujen paneelien (vaihtoehto 5) toimitusmallin käyttö Helsingin telakalla vaikuttaisi kokoonpanotelakan tuotantostrategiaan. Tällöin AHS:lla tehtäisiin rungonkoonntin lisäksi taso-, muoto-, osa- ja rengaslohkokoonntia. Lohkokoonntin aloitus lisää tuotannon tahdistuksen haasteita ja nostaa terästyön kustannuksia, kun lohkotuotantoa siirretään lohkotoimittajalta Helsingin telakalle. Ilman investointeja lohkokoonntiin soveltuvaan tuotantolinjaan ei kyseessä olevan lohkotoimitusvaihtoehdon implementointi AHS:lla ei tunnu olevan perusteltua.

Avonaisten osalohkojen (vaihtoehto 4) tapauksella sovellettaessa lohkotehtaalla valmistetaan esikoottuja paneeleita ja näistä kootaan osalohkoja. Kuitenkin osalohkot jätetään päältä avonaisiksi, joten Helsingin telakalla tehtäisiin tässäkin tapauksessa osalohkokoonntia ja siitä seuraavia terästyövaiheita.

Lohkotoimitusvaihtoehdoissa 2 ja 3 (ehjät osalohkot, avonaiset osalohkot) lohkokoonntiin liittyvän terästyön painopiste säilyisi edelleen lohkotoimittajalla. Tästä syystä nämä toimitusmallit sopisivat luonteeltaan kokoonpanotelakkakonseptiin sovellettaviksi. Tut-

kimuksessa saatujen tulosten perusteella kyseisiä lohkoitoitusmalleja sovellettaessa saadaan moduulivarustelua lisättyä merkittävästi. Moduulivarustelun maksimointia voidaan pitää yhtenä kokoonpanotelakkakonseptin tuotantostrategian kulmakivistä. Lohkoitoittajan toimittaessa avonaisia runkolohkoja olisi Helsingin telakan terästyön pääpaino rungonkoonnissa ja siihen liittyvissä toiminnoissa. Irtonaiset kattolohkot voidaan nostaa paikalleen joko varusteluhallissa ennen runkolohkon siirtoa rakennusaltaalle tai allashallissa rungonkoonnin yhteydessä.

Ehjien osalohkojen (vaihtoehto 2) toimitusmallia sovellettaessa Helsingin telakalla tehtäisiin lohko- ja rungonkoonnintia. Vaihtoehtoisesti tässä toimitusmallissa voidaan laivan runko koota rakennusaltaalla lohkoitoittajan valmistamista osalohkoista. Tämän seurauksena rakenneyksiköitä voidaan käyttää varustelun tehostamiseksi vielä rungonkoonnintapaikalla rungonkoonnin yhteydessä ennen peittävän osalohkon nostoa.

6.3 Lohkoitoitusmallien riskit

Kaikkiin viiteen tässä tutkimuksessa esitettyyn lohkoitoitusmalliin liittyy omat riskinsä koskien aikataulua, Helsingin telakan lohkopaiikkojen riittävyyttä, alkupään varustelutyön onnistumista sekä terästyön siirtämistä lohkoitoittajalta Helsingin telakalle.

Lohkoitoittajan toimittaessa EML ja EMS-varusteltuja umpinaisia runkolohkoja (vaihtoehto 1) AHS:lle, lohkovarustelutyö on saatava riittävälle tasolle jo lohkoitehtaal-la. Toinen riski tässä toimitusmallissa on lohkovarustelun aikarajoitukset. Lohkovarustelua päästään AHS:lla tekemään vasta runkolohkovaiheessa, jolloin terästyötä ja varustelua ei saada keskenään limitettyä. Tästä syystä kaikki Helsingin telakalla tehtävä lohkovarustelu on tehtävä runkolohkoihin, minkä johdosta lohkovarustelua ei välttämättä saada halutulle tasolle aikataulusyistä. Myöskään moduuleja ei päästä käyttämään hyödyksi varustelutyön nopeuttamiseksi.

Ostettaessa EML-varusteltuja päältä avonaisia runkolohkoja (vaihtoehto 2) päästään teräs- ja varustelutyötä tekemään rinnakkain runkolohkokoonnin yhteydessä. Tämän seurauksena varustelutyön loppuun suorittamiselle jää enemmän aikaa ja moduuleita voidaan käyttää varustelutyön tehostamiseksi. Tätä toimintamallia käytettäessä terästyötä siirretään lohkoitoittajalta Helsingin telakalle, mikä lisää AHS:n terästyökuormaa. Myös tässä lohkoitoitusmallissa tankkivarustelutyö on suoritettava lohkoitoittajalla.

Moduuleiden koonti- ja toimitusaikataulun sovittaminen Helsingin telakan lohkokoonti-aikatauluun luo oman riskinsä.

EML-varusteltujen ehjien osalohkojen toimitukseen (vaihtoehto 3) liittyy omat riskinsä. Kyseessä oleva toimitusmalli on tehokkaimmillaan, kun varustelu Helsingin telakalla tehdään moduuleina ja varmistetaan, että hankalakulkuisissa tankeissa varustelu on tehty jo lohkokotehtaalla. Tästä syystä on varmistettava, että moduulit saadaan aikataulun mukaisesti lohkon viereen. Koneikoiden ja rakenneyksiköiden aikataulumyöhästymät mitätöivät koko rakennustavan tehokkuuden. Terästyötä siirretään halvemman työvoiman lohkokotehtaalta Helsingin telakalle, joten varustelutyön mahdollisen epäonnistumisen johdosta ei terästyön mahdollista kustannusten nousua saada kompensoitua.

Toimitettaessa avonaisia osalohkoja Helsinkiin (vaihtoehto 4) on syytä keskittyä moduulivarustelun onnistumiseen. Koska Helsingissä tehdään osa- ja runkolohkokoontia, nousevat terästyönkustannukset tämän hetkiseen toimintamalliin nähden. Tämän toimintamallin varustelun tehokkuus perustuu pitkälti moduulivarusteluun. Varustelutyön epäonnistuminen kasvattaisi kokonaiskustannuksia. Terästyötä ja varustelua tehdään limittäin, jotta lohkon läpimenoaika ei kasva liian suureksi. Näin toimimalla varmistetaan lohkopaiikkojen riittävyys.

Siirrettäessä koko osa- ja runkolohkokoonti Helsingin telakalle (esikootut paneelit, vaihtoehto 5), lisääntyy terästyö merkittävästi edellisiin malleihin verrattuna, mikä saat-
taa kasvattaa terästyön kustannuksia. Tätä mallia sovellettaessa on varmistettava varustelutyön onnistuminen kappaleessa 5.1.4 kuvatun rakennustavan mukaisesti (taulukko 5). Varustelun epäonnistuminen johtaa kustannusten nousuun. Lohkojen läpimenoajat AHS:lla kasvavat terästyön lisääntymisen johdosta, mikä nostaa riskiä lohkopaiikkojen riittävyydelle. Tämän lisäksi terästyön kuormitus kasvaa, mikä saattaa aiheuttaa kapasiteetti-pulaa Helsingin telakalla. Tämän toimitusmallin varusteluhyödyn täysi potentiaali saadaan käyttöön vain, jos varustelu päästään tekemään jo taso- ja muotolohkokoon-
nityhteydessä. Varustelusuunnitelmien on siis oltava entistäkin aikaisemmassa vaiheessa valmiita.

6.4 Tulosten vertailu aikaisempaan tutkimukseen

Varustelun tehokkuutta kokoonpanotelakkakonseptissa ei ole kirjallisuuden perusteella aikaisemmin mallinnettu. Tästä syystä tulosten suora vertailu aikaisempaan tutkimuk-

seen ei onnistu. Tehtyjen tutkimusten perusteella voidaan yleisesti todeta, että varustelutyön suorittamisen aikaistaminen nopeuttaa varustelutyötä ja tämän seurauksena vähentää varusteluun kuluvia työtunteja. Esimerkiksi Rubesa (Rubesa, et al., 2011) toteaa tutkimuksessaan, että modulaarisen varustelun avulla laivanrakennusprosessin läpimenoaika voidaan lyhentää ilman investointi tarpeita uusiin tuotantotiloihin. Myös telakka 2000 hankkeen yhteydessä teetetyissä tutkimuksissa todetaan, että lohkovarusteluasteen nostamisella voidaan saavuttaa laivanrakennusprosessissa aika- ja työtuntisäästöjä sekä vähentää valmistuskustannuksia (Nallikari, et al., 1995; Nallikari, et al., 1994).

Tässä tutkimuksessa jatkokehitetyn mallin pohjana olleessa artikkelissa (Fafandjel, et al., 2008) saatiin samankaltaisia tuloksia siirtämällä työtä aluevaiheesta moduulivarusteluvaiheeseen. Kyseisessä artikkelissa päädyttiin siihen tulokseen, että laivanrakennusprosessin kokonaiskesto voidaan vähentää 31 % varustelun suoritustapaan ja -ajankohtaan tehtävillä muutoksilla. Tässä tutkimuksessa eri lohkoitoimitusvaihtoehdoille lasketut varustelun kokonaistyömäärän muutokset suhteessa referenssiprojektiin (-17 %, -21 %, -25 %, -27 %, -28 %) ovat samassa linjassa Fafandjelin tutkimuksen kanssa.

Ozkok esitti simulointi pohjaisessa tutkimuksessaan, että tekemällä lohkokoontipaikalla suoritettava putkien ja muun varustelumateriaalin asennustyö vielä aikaisemmassa tuotantovaiheessa voidaan lohkon läpäisyäikää lyhentää 33% (Ozkok & Helvacioğlu, 2013). Kyseisen tutkimuksen tuloksia ei suoraan voida verrata saatuihin tuloksiin, koska katsontakannat ovat poikkeavia. Kuitenkin edellä kuvatussa tutkimuksessa päädyttiin tulokseen, että aikaistamalla varustelutyötä tuotannon tehokkuudessa voidaan saavuttaa suuria harppauksia.

7 Yhteenveto ja johtopäätökset

Tässä diplomityössä tutkittiin työaluksen konetornin rakennustavan vaikutusta varustelun tehokkuuteen kokoonpanotelakkakonseptissa. Konetornin varustelutyö esiintyy Helsingin telakalla yleisesti työaluksen uudisrakennusprojektin kriittisellä polulla ja kyseisen tornin varustelutunnit kattoivat 58% referenssiprojektin toteutuneista konevarustelutunneista.

Työn päätavoitteena oli vertailla viittä eri lohkoitoitusmallia Helsingin telakalla tehtävän varustelutyön tehokkuuden maksimoimiseksi. Kyseisen vertailun suorittamisen tueksi tutkimuksessa määritettiin menetelmä lohkovarustelun hyvyyden mittaamiseksi ja luotiin menetelmää tukeva laivan varusteluprosessin laskentamalli. Tutkimuksessa luotiin lisäksi laivan runkorakenteiden teräsmoduuleille uusi hierakia ja yksinkertaistettiin kyseisten moduuleiden termistöä. Suurin muutos termistössä oli termin suurlohko korvaaminen termillä runkolohko. Tämä tarkoittaa, että kaikkia laivan runkoon rungonkoontivaiheessa liitettäviä teräsrakennemoduuleita kutsutaan runkolohkoiksi.

Lohkovarustelun hyvyyden mittaamiseksi työssä päädyttiin käyttämään alkupään varustelun tunteja suhteessa laivaprojektin kokonaisvarustelutunteihin. Kokonaisvarustelutunteihin laskettiin mukaan vain tuotannon välittömät työtunnit. Tämä tarkoittaa, että esimerkiksi työnjohdon ja työnsuunnittelun työtunnit jätettiin tutkimuksen ulkopuolelle.

Tutkimuksen tueksi kehitetty laivan varusteluprosessin laskentamalli perustuu eri varustelutoimintojen välisten työaikakertoimien avulla kehitettyyn laskentamalliin. Tässä mallissa varustelutyötä siirretään aluevarusteluvaiheesta moduuli-, taso- ja lohkovarustelutoimintoihin rakennustavan sallimissa rajoissa. Mallin avulla pystytään vertailemaan varustelutyön ja sen kokonaiskeston muutosta eri lohkoitoitusmallien välillä kokoonpanotelakkakonseptissa. Kirjallisuuskatsauksen perusteella edellä kuvattua mallintamista ei ole aikaisemmin analyttisesti kokoonpanotelakkakonseptissa tehty. Varusteluprosessin laskentamallista voidaan yleisesti todeta, että tärkeintä ei ole mallin monimutkaisuus vaan lähtötietojen oikeellisuus.

Mallin soveltaminen antaa hyvän kokonaiskuvan varustelun kokonaiskeston muutoksesta, kun aluevarustelutyötä siirretään alkupään varusteluun tehtäväksi. Nyrkkisääntönä

on, että mitä aikaisemmassa vaiheessa varustelutyö päästään suorittamaan, sitä tehokkaampaa se työtehokkuuden kannalta on. Luotua mallia voi soveltaa varustelun kokonaisvarusteluajan muutoksen mallintamiseen kaikilla telakoilla olettaen, että edellisten laivaprojektien varustelutoimintojen (moduulivarustelu, tasolohkovarustelu, lohkovarustelu ja aluevarustelu) tuntijakaumasta on olemassa luotettavaa статистиikkaa.

Varustelutyön tehokkuuden mittaamiseksi, luodun laskentamenetelmän avulla, tutkittiin viiden eri lohkoitoimitusmallin (umpinaiset runkolohkot, avonaiset runkolohkot, ehjät osalohkot, avonaiset osalohkot, esikootut paneelit) vaikutusta konetornin kokonaisvarustelutunteihin. Kaikille tutkittaville lohkoitoitusmalleille luotiin työssä erillinen rakennustapa. Tämän rakennustavan ja telakalta saatujen tietojen perusteella eri lohkoitoitusmalleille määritettiin lähtömuuttujat eli eri varustelutoimintojen osuus konetornin kokonaisvarustelutyöstä.

Saatujen tulosten perusteella voidaan todeta, että lohkovarustelun hyötyjä kokoonpanotelakkakonseptissa voidaan paremmin hyödyntää tilaamalla lohkoitoittajalta avonaisia runkolohkoja tai vaihtoehtoisesti ehjiä osalohkoja. Edellä mainittuja lohkoitoitusmalleja hyödyntämällä konetornin varustelutyön kokonaiskesto pienenee 21 % (avonaiset runkolohkot) tai 25 % (ehjät osalohkot). Näiden mallien käyttö mahdollistaa tehokkaan moduulivarustelun sekä lohkovarustelun suorittamisen vielä Helsingin telakalla ja ne sopivat strategisesti kokoonpanotelakkakonseptissa sovellettaviksi. Varustelun tehokas suorittaminen KPT- konseptissa vaatii yhä enemmän varustelutyön siirtämistä pois laivasta. Tätä ajatusta moduuli- ja lohkovarustelun kasvattaminen tukee erinomaisen hyvin.

Tehdyn tutkimuksen perusteella kokonaisuuden kannalta tehokkaimpien lohkoitoitusmallien (avonaiset runkolohkot, ehjät osalohkot) sekä referenssiprojektin varustelutoimintojen osuuksien vertailu on esitetty taulukossa 9. Edellä kuvattuun varustelutyön kokonaiskeston muutokseen päästään tilaamalla lohkot lohkoitoittajalta lohko- ja moduulivarustelua tukevin kokonaisuuksina (avonaiset runkolohkot, ehjät osalohkot) ja varmistamalla lohkovarustelulle jäävän riittävästi aikaa sekä varmistamalla tankkivarustelun onnistuminen lohkoitoittajan tuotantotiloissa.

Taulukko 9. Varustelutoimintojen osuus eri lohkoimitusmalleilla

Toiminnon kuvaus	Referenssiprojekti	Avonaiset runkolohkot	Ehjät osalohkot
Moduulivarustelun osuus	2 %	6 %	8 %
Tasolohkovarustelun osuus	0 %	1 %	2 %
Lohkovarustelun osuus	19 %	39 %	38 %
Aluevarustelun osuus	79 %	54 %	52 %
Yhteensä	100%	100%	100%
Konetornin varustelukesto			
Varustelun kokonaistyömäärä	100%	79%	75%

Tämän tutkimuksen perusteella voidaan yleisesti todeta, että suorittamalla varustelutyö mahdollisimman aikaisessa vaiheessa, voidaan varustelutyön kokonaistyömäärässä säästää suuriakin säästöjä. Laivaprojektin lohkojen lohkoimitusmallia muuttamalla tutkimuksessa suositeltuun suuntaan saadaan työtä siirrettyä pois laivasta ja tämän seurauksena konetornin varustelutyö tehostuu.

Mallin suurimmat epävarmuustekijät liittyvät työaikakertoimien (Y_1 , Y_2 , Y_3 , Y_4) parametreihin sekä työn jakautumiseen eri varustelutoimintoihin (moduulivarustelu, tasolohkovarustelu, lohkovarustelu, aluevarustelu) tutkituissa lohkoimitusmalleissa. Työaikakertoimet perustuvat kirjallisuuden ja telakan asiantuntijahaastatteluiden perusteella arvioituihin parametreihin. Näiden kertoimien tarkkaan paikkansapitävyyteen on syytä suhtautua varauksella, koska niiden oikeellisuutta on olemassa olevan tilastitiikan puutteellisuuden vuoksi vaikea varmistaa. Eri lohkoimitusmalleissa esiintyvät varustelutoimintojen jakaumat perustuvat telakalta saatuihin tietoihin sekä kirjoittajan omaan harkintaan. Tästä syystä kyseisen jakauman oikeellisuus voidaan varmistaa vasta tulevaisuudessa empiirisen tutkimuksen avulla, pitämällä kirjaa alkupään varustelutuntien jakautumisesta eri varustelutoimintoihin.

Edellä kuvattujen epävarmuustekijöiden vaikutuksen tunnistamiseksi konetornin kokonaisvarustelu-aikaan tutkimuksessa tehtiin herkkyysanalyysi työaikakertoimien parametreille sekä työn jakautumiselle eri toimintoihin. Tehdyn herkkyysanalyysin pohjalta

dominoivimmaksi parametriksi ilmeni aluevarustelun työaikakerroin. Tätä kerrointa määritettäessä myös kirjallisuudessa ja Helsingin telakan sisällä esiintyi eniten vaihtelua. Tästä syystä kyseinen työaikakerroin valittiin konservatiivisesti.

Jatkotutkimustarpeet

Kappaleessa 1.3 esitetyn työn rajauksen mukaisesti tutkimuksessa ei otettu huomioon mahdollista terästyön hinnannousua, kun terästyötä siirtyy tehtäväksi Helsingin telakalle lohkoimittajan tuotantotiloista. Ennen edellä ehdotettujen lohkoimitusmallien käyttöönottoa on syytä varmistaa, että terästyön hinta ei kasva suhteessa enempää, kuin varustelun tehostamisesta hyödytään. Lohkojen rakennustavan muutos vaikuttaa myös rungonkoon, koska runkolohkot eivät enää ole päältä umpinaisia tai runko kootaan pienemmistä teräsmoduuleista. Tämän muutoksen vaikutusta on tulevaisuudessa syytä tutkia ja tämän avulla varmistaa tehokkain toimintamalli.

Varustelun tehokkuuden kannalta valittujen lohkoimitusmallien aikatauluvaikusta koko laivaprojektiin ja varustelun läpimenoaikaan tulisi tutkia projektihallintaohjelmistoa hyväksikäyttäen. Aikataulun avulla voidaan myös varmistua AHS:n lohkoapaikkojen riittävydestä, kun terästyötä siirtyy lohkoimittajalta Helsingin telakalle.

Kolmas tutkimustarve on moduulivarustelun kasvattamisen mahdollisuudet konetornin lohkoissa. Tämä tutkimus voi pohjautua esimerkiksi liitteessä yksi esitettyyn moduulivarustelun kustannushyödyn arvioimismenetelmään. Moduloinnin maksimoinnilla saadaan tässä tutkimuksessa esitetyistä lohkoimitusmalleista paras hyöty varustelun tehokkuuden kannalta.

8 Lähdeluettelo

Altic, Brian; Burns, Richard; Scott, Ian; Silveira, John; Softley, John; Fontaine, B., 2003. Implementation of an Improved Outfit Process Model. *Journal of Ship Production*, 19(1), pp. 1-7.

Anttila, T., 2012. *Alihankintaprosessin kehittäminen levyosavalmistuksessa*, Tampere: Tampereen Teknillinen Yliopisto.

Arctech, 2014. *Arctech Helsinki Shipyard kotisivu*. [Online] Available at: <http://arctech.fi/fi/about-us/> [Haettu 30.7.2014].

Arctech Helsinki Shipyard, 2014. *Navisworks 3D-malli*. Helsinki: Telakan sisäinen materiaali.

Baade, Ralf; Klinge, Friedrich; Lynaugh, Kevin; Woronkowicz, Frank; Seidler, Klaus-Michael, 1998. Modular Outfitting. *Journal of ship production*, 14(3), pp. 170-179.

Banks, J., 2005. *Discrete-event system simulation*. Upper Saddle River(New Jersey): Pearson Prentice Hall.

Bunch, H., 1995. Catalogue of ship producibility improvement concepts. *Journal of Ship Production*, 11(3), pp. 203-207.

Emblemsvåg, J., 2014. Lean Project Planning in Shipbuilding. *Journal of ship production*, 30(2), pp. 79-88.

Ennis, Kristina; Daugherty, John; Lamb, Thomas; Greenwell, Charles; Zimmermann, Richard, 1998. Product-oriented design and construction cost model. *Journal of Ship Production*, 14(1), pp. 41-58.

Eyres, D. J., 2006. *Ship Construction*. Jordan-Hill: Butterworth-heinemann.

Fafandjel, N., Rubesa, R. & Mrakovcic, T., 2008. Procedure for Measuring Shipbuilding Process Optimisation Results after using Modular Outfitting Concept. *Strojarstvo*, 50(3), pp. 141-150.

Fan, X., Lin, Y. & Ji, Z., 2007. Ship pipe routing design using the ACO with iterative pheromone updating. *Journal of Ship Production*, 23(1), pp. 36-45.

Gagali, A., Veza, I. & Markovina, R., 2009. Interactive Networked Company in Shipbuilding Industry. *Strojarstvo*, 51(1), pp. 15-26.

Gustafsson, J., 1997. Terästuotantoprosessi. Teoksessa: P. Räisänen, toim. *Laivatekniikka; Modernin laivanrakennuksen käsikirja*. Jyväskylä: Gummerus Kirjapaino OY, p. Kappale 35.

Havas, T., 2014. *Projektisuunnittelija* [Haastattelu] (25.7.2014).

Hokkanen, S., Karhunen, J. & Luukkainen, M., 2011. *Johdatus logistiseen ajatteluun*. 6. toim. Kangasniemi: SHO Business Development Oy.

Holmström, J., 1997. Varustelu. Teoksessa: P. Räisänen, toim. *Laivatekniikka; modernin laivanrakennuksen käsikirja*. Jyväskylä: Gummerus Kirjapaino Oy, p. luku 39.

Huttunen, H., 2014. Developing Shipbuilding Methods. Teoksessa: H. Kulmala, M. Nallikari, K. Artto & J. Anttila, toim. *Final report 1/2014; Innovations & Network*. Tampere: FIMECC Oy, pp. 91-96.

Hölttä-Otto, K., 2005. *Modular product platform design*, Espoo: Teknillinen korkeakoulu.

Johansson, O., 2013. *Meriteollisuus 2020 -kilpailukykyryöryhmä mietintö*. Helsinki: Työ- ja elinkeinoministeriö.

Johnson, C. S., 1979. *Outfit planning*. Washington: Washington: U.S. Dept. of Commerce, Maritime Administration in cooperation with Todd Pacific Shipyards Corporation.

Kauranen I., Mustakallio, M. & Palmgren, 2006. *Tutkimusraportin kirjoittamisen opas opinnäytetyöntekijöille*. Helsinki: Picaset Oy.

Kim, H., Lee, S., Park, J. & Lee, J., 2005. A model for a simulation-based shipbuilding system in a shipyard manufacturing process. *International Journal of Computer Integrated Manufacturing*, 18(6), pp. 427-441.

Koskela, L. & Vrijhoef, R., 2000. The Four Roles of Supply Chain Management in Costruction. *European Supply Chain Management*, 6(3), pp. 169-178.

Kosola, P., 1997. Perussuunnittelu. Teoksessa: P. Räisänen, toim. *Laivatekniikka; modernin laivanrakennuksen käsikirja*. Jyväskylä: Gummerus Kirjapaino Oy, p. kappale 35.

Kosola, P., 1997. Valmistussuunnittelu. Teoksessa: P. Räisänen, toim. *Laivatekniikka; modernin laivanrakennuksen käsikirja*. Jyväskylä: Gummerus Kirjapaino Oy, p. kappale 36.

Kumar, A. A. & Aoyama, K., 2009. Module division planning considering uncertainties. *Journal of Ship Production*, 25(3), pp. 153-160.

König, M., Steinhauer, D., Bargstädt , H.-J. & Beissert, U., 2007. *Constraint-based simulation of outfitting processes in shipbuilding and civil engineering*. Ljubljana, 6th EuroSim Congress on Modeling and Simulation.

Lauren, Timo; Notkonen, Kari; Ojaluoma, Tuula; Ritalahti, Jyrki; Rytkölä, Ilkka, 2003. *Kustannuskilpailukyyn kehittäminen toimitusketjussa*, Helsinki: Masa Business School.

Liker, J. & Lamb, T., 2002. What is Lean Ship Construction and Repair. *Journal of ship production*, 18(3), pp. 121-142.

Lilley, D., Degraw, K. & Wallen, R., 2001. Development and implementation of computer simulation models for the manufacturing of outfitting components. *Journal of ship production*, 17(1), pp. 16-26.

Maffioli, P., Daidola, J. C. & Oliver, J., 2001. Competitive shipbuilding production practices. *Transactions- Society of naval Architects and Marine Engineers* 109, pp. 309-339.

Mattson, C. A. & Maglepy, S. P., 2001. *The influence of product modularity during concept selection of consumer products*. Pittsburgh, Brigham Young University, pp. 299-308.

Meyer Werft GmbH, 2010. [Online] Available at: http://www.meyerwerft.de/media/pdfs/pdf/EN_Martime_Technology..pdf [Haettu.11.24.2014].

Nallikari, Matti; Nordman, Kai; Taiminen Pekka; Tiainen, Raimo; Viherkoski, Tommi; Äännevaara, Touko, 1995. Harmonisointimalli, rakennustavan kustannukset. Teoksessa: P. Taiminen & M. Nallikari, toim. *Kevyt ja joustava telakka*. :Telakka 2000.

Nallikari, M., Tiainen, R., Viherkoski, T. & Äännevaara, T., 1994. Tuottavuus valmistusprosessin eri vaiheissa. Teoksessa: P. Taiminen, toim. *Kevyt ja joustava telakka*. :Telakka 2000.

Nellimo, K. & Uusi-Rauva, E., 2005. *Johdon laskentatoimi*. 6 toim. Helsinki: Edita Prima Oy.

Niemelä, A., 2005. *Materiaalivirtojen hallinta kokoonpanotelakkakonseptissa*, Espoo: Teknillinen Korkeakoulu.

Niemi, N., 2006. *Laivan verkoittuneen kokoonpanoprosessin mallinnus*, Espoo: Teknillinen Korkeakoulu.

Nousiainen, P., 2014. *Lohkovarustelun kehittäminen* [Haastattelu] (9.7.2014).

Ozkok, M. & Helvacioğlu, H., 2013. A Continuous Process Improvement Application in Shipbuilding. *Brodogradnja*, 64(1), pp. 31-39.

Ozkok, M. & Helvacioğlu, H. I., 2013. Determination of the effects of the pre-outfitting and pre-piping assembly operations on shipyard productivity. *polish maritime research*, 20(1), pp. 59-69.

Phogat, S., 2013. An introduction to applicability of lean in shipbuilding. *International Journal of Latest Research in Science and Technology*, 2(6), pp. 85-89.

Remes, H., 2013. *Laivan tuotantotekniikka*. Luento 9; Varustelutuotanto toim. Espoo: Aalto Yliopisto.

Roy, R., Souchoroukov, P. & Griggs, T., 2008. Function-based cost estimating. *International Journal of Production Research*, 46(10), pp. 2621-2650.

Rubesa, R., Fafandjel, N. & Kolic, D., 2011. Procedure for estimating the effectiveness of ship modular outfitting. *Engineering Review*, 31(1), pp. 55-62.

Sako, M. & Murray, F., 2000. *Modules in Design, Production and Use: Implications for the global automotive industry*, Oxford: University of Oxford.

Schank, John F.; Pung, Hans; Lee, Gordon; Arena, Mark; Birkler, John, 2005. *Outsourcing and outfitting practices: implications for the Ministry of Defence*, Santa Monica: RAND corporation.

Steinhauer, D. & Soyka, M., 2012. *Development and applications of simulation tools for one-of-a-kind production processes*. Flensburg, Proceedings of the 2012 Winter Simulation Conference.

Storch, R. L., Hammond, C., Bunch, H. & Moore, R., 1995. *Ship Production*. 2nd toim. Jersey City: SNAME.

Tamminen, P., 1997. Telakkatekniikan perusteet. Teoksessa: P. Räisänen, toim. *Laivatekniikka: Modernin Laivanrakennuksen Käsikirja*. Jyväskylä: Gummerus Kirjapaino Oy, p. kappale 30.

Tokola, H. A., Niemi, E. & Remes, H., 2014. *Block erection in the event of delays in shipbuilding; a scenario- based approach*, Espoo: Aalto University.

Tsai, Y.-. T. & Chang, Y.-. M., 2004. Function-based cost estimation integrating quality function deployment to support system design. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 23(7), pp. 514-522.

Tuokkola, M., 2014. *Tuotannonsuunnittelija* [Haastattelu] (30.7.2014).

Wei, Y., 2012. *Automatic generation of assembly sequence for the planning of outfitting processes in shipbuilding*, Delft: VSSD.

Wei, Y. & Nienhuis, U., 2010. *An approach to improve advanced outfitting practices in ship construction - automatic scheduling system*. Sydney, Pacific 2010.

Willberg, M., 2007. *Maalauksen jälkeisen lohkovarustelun kehittäminen*, Helsinki: Aker Yards Oy.

Österholm, J. & Tuokko, R., 2001. *Systemaattinen menetelmä tuotemodulointiin : Modular Function Deployment*. Helsinki: Metalliteollisuuden keskusliitto.

Liitteet

Liite 1. Modulaarisen varustelun kustannushyödyn arvioimismenetelmä

Liite 2. Varustelutoimintojen optimointimalli

Liite 3. Varustelutoimintojen kestot eri lohkoimitus vaihtoehdoille

Liite 1. Modulaarisen varustelun kustannushyödyn arvioimismenetelmä

Työ ositetaan järjestelmäkohtaisesti taulukossa 10 esitetyn sarakkeen yksi mukaisesti. Taulukossa esitetyt järjestelmät sijaitsevat pääsääntöisesti laivaprojektin konetornin lohkoissa. Sarake kaksi kuvaa järjestelmän modulaarisuusasteen nykytasoa ja sarakkeessa kolme arvioidaan modulaarisuusasteen maksimitasoa. Viimeisissä sarakkeissa neljä, viisi ja kuusi määritetään työn kesto järjestelmäkohtaisesti eri varusteluvaiheissa. (Rubesa, et al., 2011)

Taulukko 10. Työkertoimet eri konetornin systeemeille varusteluajankohdan perusteella (Rubesa, et al., 2011)

Työnositus järjestelmäksi	MN (%)	MK (%)	AK	LK	KK
Alustat	30	95	1	0,4	0,2
Huonekalut	80	100	1	0,3	0,2
Hydrauliikka	5	55	1	0,4	0,3
Ilmanvaihto	0	50	1	0,6	0,4
Ilmastointi	5	70	1	0,5	0,3
Kaapeliradat	0	70	1	0,6	0,4
Konseptisuunnittelu	10	70	1	1,2	1,4
Makeavesi	30	75	1	0,4	0,25
Merivesi	40	80	1	0,4	0,2
Mustavesi	10	60	1	0,4	0,2
Painolasti	20	60	1	0,4	0,35
Pakoputket	10	80	1	0,4	0,4
Palontorjunta	25	70	1	0,4	0,3
Pilssivesi	25	65	1	0,4	0,2
Perussuunnittelu	5	40	1	1,1	1,3
Polttoaine	25	70	1	0,4	0,35
Propulsio	5	50	1	0,5	-
Sisustus	30	85	1	0,5	0,3
Sähköjakelu	20	70	1	0,5	0,2
Sähkölaitteet	20	70	1	-	0,2
Tuotantokuvat	25	70	1	1,4	1,6
Valmistussuunnittelu	25	70,	1	1,4	1,6
Voiteluöljy	25	70	1	0,4	0,3

Selite:

- MN (Modulaarisuusasteen nykytaso) = Käytössä oleva modulaarisuuden käyttöaste koskien kaikkea systeemiin liittyvää varustelutyötä
- MK (Modulaarisuusasteen kokonaistaso) = Arvioitu maksimaalinen prosentti modulaariselle varustelutyölle systeemikohtaisesti
- AK (Aluevarustelukerroin) = Työnkeston kerroin aluevarustelutyölle
- LK (Lohkovarustelukerroin) = Työnkeston kerroin lohkovarustelutyölle
- KK (Koneikkokerroin) = Työnkeston kustannuskerroin koneikkovarustelutyölle

Aluevarustelukertoimeksi (AK) on valittu työssä kerroin 1. Lohko- ja koneikkovarustelukertoimet (LK, KK) on mukautettu kuvastamaan työn vähenemisen määrää, kun varustelutyötä aikaistetaan aluevarusteluvaiheesta aikaisempiin varusteluvaiheisiin ja siirretään työtä parempiin työskentelyolosuhteisiin työpajoille.

Järjestelmäkohtaisesta työnositus taulukosta (taulukko 10) havaitaan työn keston olevan riippuvainen sekä asennettavasta järjestelmästä, että varustelun suorittamisajankohdasta (Rubesa, et al., 2011). Työkertoimet järjestelmittäin ovat Rubesan tutkimuksessa arvioitu tutkimuksen esimerkki tiedon ja pitkän aikavälin seurannan pohjalta. Mallin avulla pystytään määrittämään mitkä systeemiasennukset on syytä suorittaa lohkovaiheessa ja toisaalta mitkä systeemiasennukset voidaan jättää aluevaiheeseen työnkeston pohjautuen.

Lohko- ja koneikkovarustelun kasvun kustannusvaikutuksia laivaprojektin varustelukustannuksiin arvioidaan alla esitetyn matemaattiseen malliin perustuen (Rubesa, et al., 2011). Kaavoissa (11–15) esiintyvät termit on selitetty auki taulukossa 10.

Varustelutyön siirtämisestä aluevarustelusta koneikkovarusteluun saatava kustannus-hyöty mallinnetaan seuraavan yhtälön avulla:

$$KS_{AK} = \frac{MK - MN}{100} * (AK - KK) * MH * TK \quad (11)$$

Varustelutyön siirtämisestä lohkovarustelusta koneikkovarusteluun koituva kustannus-hyöty mallinnetaan alla esitetyn yhtälön mukaisesti:

$$KS_{LK} = \frac{MK - MN}{100} * (LK - KK) * MH * TK \quad (12)$$

$$KS_{AK} = \frac{MK - MN}{100} * (AK - KK) * \sum_{i=1}^n (MH_i * TK_i) \quad (13)$$

$$KS_{LK} = \frac{MK - MN}{100} * (LK - KK) * \sum_{i=1}^n (MH_i * TK_i) \quad (14)$$

Kaavoissa yllä termi MH kuvaa miestyötunteja ja termi TK puolestaan kuvaa työvoiman kustannusta tuntia kohden.

Kokonaiskustannussäästöt saadaan alla esitetyn yhtälön avulla:

$$KS_{TOT} = \sum KS_{AK} + \sum KS_{LK} \quad (15)$$

Liite 2. Varustelutoimintojen optimointimalli

Taulukko 11. Varustelutoimintojen keston vertailutaulukko (Fafandjel, et al., 2008)

		A	B	C	D	E
	Toiminnon kuvaus	Tämän hetkinen toiminnon kesto (työtunteja)	Tämän hetkinen toiminnon kesto (%)	Ero toiminnon kestossa (työtunteja)	Uuden konseptin mukainen toiminnon kesto (työtunteja)	Relatiivinen toiminnon keston muutos
1.	Lohkovarustelu					
2.	Modulaarinen varustelu					
3.	Aluevarustelu					
4.	Viimeistelyvarustelu					

Yllä olevassa taulukossa (taulukko 11) esitetyt uuden konseptin mukaiset toiminnonkestojen arvot, kun kasvatetaan modulaarisen varustelun ja vähennetään muiden varustelutoimintojen tunteja, lasketaan seuraaviin kaavoihin perustuen (Fafandjel, et al., 2008):

$$D1 = A1 + C1 \quad (16)$$

$$D2 = A2 + C1/Y_3 + C3/Y_4 + C4/Y_5 \quad (17)$$

$$D3 = A3 + C3 \quad (18)$$

$$D4 = A4 + C4 \quad (19)$$

missä kirjaimet kuvaavat taulukon 11 sarakkeita ja numerot rivejä. Muuttujat Y_3 , Y_4 ja Y_5 kuvaavat työkertoimia eri varusteluvaiheissa. Fafandjel määrittelee tutkimuksessaan näille kertoimeksi 3 : 5 : 7 moduulivarustelun työaikakertoimen ollessa 1.

Uuden konseptin mukaisen modulaarisen varustelun kasvu lasketaan yhtälöllä (17). Uudet toiminnonkeston arvot lohkovarustelulle, aluevarustelulle ja viimeistelyvarustelulle saadaan määritettyä yllä esitettyjen kaavojen (16), (18) ja (19) avulla.

Samaa menetelmää voidaan käyttää kun tutkitaan lohkovarustelutuntien lisäämisen vaikutusta aluevarustelutuntien vähenemiseen. Tämän tapauksen ollessa kyseessä käytetään seuraavia kaavoja:

$$D1 = A1 - C2 * Y_3 - C2 * (Y_4 / Y_3) - C4 * (Y_5 / Y_3) \quad (20)$$

$$D2 = A2 + C2 \quad (21)$$

$$D3 = A3 + C3 \quad (22)$$

$$D4 = A4 + C4 \quad (23)$$

Lohkovarustelun tuntimääräistä kasvua kuvataan yllä yhtälöllä (20). Kasvun ennusteessa otetaan huomioon työaikakertoimet eri varusteluvaiheille, koska lohkovaiheessa varustelutyön tekeminen on tehokkaampaa kuin aluevaiheessa ja viimeistelyvaiheessa, mutta moduuli- ja koneikkovarustelu on työajan suhteen tehokkaampaa verrattuna lohkovarusteluun. Uudet toiminnonkeston arvot moduulivarustelulle, tasolohkovarustelulle ja aluevarustelulle saadaan määritettyä yllä esitettyjen kaavojen (21), (22) ja (23) avulla.

Liite 3. Varustelutoimintojen kestot eri lohkotoimitus vaihtoehtoil

Taulukoissa 12 - 16 on esitetty tutkimuksessa määritettyjen työaikakertoimien ja käytetyn laskentamallin avulla lasketut uuden konseptin mukaiset varustelutoimintojen kestot eri lohkotoimitusvaihtoehtoil. Kyseiset varustelutoimintojen kestot on esitetty taulukkojen 12 - 16 sarakkeessa D. Taulukkojen sarakkeessa B on esitetty referenssiprojektin varustelutoimintojen jakautuminen eri varustelutoimintoihin. Sarakkeessa E on esitetty uusien (mallin avulla lasketut tulokset) ja vanhojen (referenssiprojektin) varustelutoimintojen keston muutosta prosentteina.

Taulukko 12. EML ja EMS varusteltujen umpinaisten runkolohkojen toimitus Helsinkiin (vaihtoehto 1)

		B	D	E
	Toiminnon kuvaus	Tämän hetkinen toiminnon kesto (%)	Uuden konseptin mukainen toiminnon kesto (%)	Relatiivinen toiminnon keston muutos (%)
1.	Modulaarinen- ja koneikkovarustelu	2 %	3 %	40 %
2.	Tasolohkovarustelu	0 %	1 %	34 %
3.	Lohkovarustelu	19 %	39 %	76 %
4.	Aluevarustelu	79 %	57 %	-40 %

Taulukko 13. EML varusteltujen päältä avonaisten runkolohkojen toimitus Helsinkiin (vaihtoehto 2)

		B	D	E
	Toiminnon kuvaus	Tämän hetkinen toiminnon kesto (%)	Uuden konseptin mukainen toiminnon kesto (%)	Relatiivinen toiminnon keston muutos (%)
1.	Modulaarinen- ja koneikkovarustelu	2 %	6 %	160 %
2.	Tasolohkovarustelu	0 %	1 %	68 %
3.	Lohkovarustelu	19 %	39 %	63 %
4.	Aluevarustelu	79 %	54 %	-46 %

Taulukko 14. EML varusteltujen osalohkojen toimitus Helsinkiin (vaihtoehto 3)

		B	D	E
	Toiminnon kuvaus	Tämän hetkinen toiminnon kesto (%)	Uuden konseptin mukainen toiminnon kesto (%)	Relatiivinen toiminnon keston muutos (%)
1.	Modulaarinen- ja koneikkovarustelu	2 %	8 %	240 %
2.	Tasolohkovarustelu	0 %	2 %	170 %
3.	Lohkovarustelu	19 %	38 %	52 %
4.	Aluevarustelu	79 %	52 %	-50 %

Taulukko 15. Avonaisten osalohkojen toimitus Helsinkiin (vaihtoehto 4)

		B	D	E
	Toiminnon kuvaus	Tämän hetkinen toiminnon kesto (%)	Uuden konseptin mukainen toiminnon kesto (%)	Relatiivinen toiminnon keston muutos (%)
1.	Modulaarinen- ja koneikkovarustelu	2 %	10 %	280 %
2.	Tasolohkovarustelu	0 %	4 %	511 %
3.	Lohkovarustelu	19 %	36 %	40 %
4.	Aluevarustelu	79 %	51 %	-53 %

Taulukko 16. Esikoottujen teräspaneelien toimitus Helsinkiin (vaihtoehto 5)

		B	D	E
	Toiminnon kuvaus	Tämän hetkinen toiminnon kesto (%)	Uuden konseptin mukainen toiminnon kesto (%)	Relatiivinen toiminnon keston muutos (%)
1.	Modulaarinen- ja koneikkovarustelu	2 %	10 %	280 %
2.	Tasolohkovarustelu	0 %	5 %	681 %
3.	Lohkovarustelu	19 %	35 %	36 %
4.	Aluevarustelu	79 %	50 %	-54 %